

## การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย

นายอภิชาติ สุดดีพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2552

**STRENGTH DEVELOPMENT IN CEMENT - FLY ASH  
ADMIXED CLAY**

**Apichat Suddeepong**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2009**

## การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เกล้าลอย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อภิชาติ สุดดีพงษ์ : การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย (STRENGTH DEVELOPMENT IN CEMENT - FLY ASH ADMIXED CLAY)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ ห่อพิบูลสุข, 85 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวลต่อการพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย และอธิบายพฤติกรรมการพัฒนากำลังอัดด้วยโครงสร้างจุลภาคจากผลทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM) และ Thermal Gravimetry Analysis (TGA) จากการศึกษาพบว่าที่ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่มค่าหนึ่ง กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยจนกระทั่งปริมาณเถ้าลอยเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ รูปถ่าย SEM และผลทดสอบ TGA แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นและปริมาณปูนซีเมนต์ ซึ่งควบคุมขนาดโพรงและผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน ตามลำดับ รูปถ่าย SEM แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกในดินซีเมนต์เถ้าลอยเกิดขึ้นน้อยมาก ดังจะเห็นได้จากผิวเถ้าลอยที่ยังคงเรียบไม่ถูกกัดกร่อนโดยปฏิกิริยาปอซโซลานิก ในช่วงปริมาณเถ้าลอยน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ เถ้าลอยทำหน้าที่เป็นวัสดุกระจายตัวซึ่งทำให้อนุภาคดินเหนียวและปูนซีเมนต์กระจายตัวและสัมผัสน้ำได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีขึ้น โดยที่ชนิดของเถ้าลอยไม่ผลต่อการพัฒนากำลังอัด การใส่เถ้าลอยในดินผสมซีเมนต์จึงเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มปริมาณของปูนซีเมนต์ จากแนวคิดดังกล่าว ผู้วิจัยได้นำเสนอตัวแปรใหม่ซึ่งเรียกว่า “ปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า” และใช้ร่วมกับ Clay-water/cement ratio hypothesis ในการวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย ผู้วิจัยพบว่ากำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลอยในช่วงปริมาณความชื้น 1 ถึง 2 เท่าของดัชนีสภาพเหลว แปรผันตามอัตราส่วนน้ำในดินต่อปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบของ TGA ที่พบว่าที่ปริมาณความชื้นเดียวกัน ดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากัน แม้ว่าจะมีปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณเถ้าลอยต่างกัน จะมีค่าปริมาณผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานเท่ากัน ทั้งเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวลมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ 0.75 เท่าของปูนซีเมนต์ สำหรับทุกอัตราส่วนผสมระหว่างปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าลอยท้ายสุด ผู้วิจัยได้สร้างสมการประมาณกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อายุบ่มและอัตราส่วนผสมต่าง ๆ (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าลอย) โดยอาศัยเพียงผลทดสอบที่อายุบ่ม 28 วัน

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา\_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา\_\_\_\_\_



APICHAT SUDDEEPONG : STRENGTH DEVELOPMENT IN CEMENT-  
FLY ASH ADMIXED CLAY. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.  
SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., 85 PP.

#### FLY ASH/CLAY/CEMENT/STRENGTH/MICROSTRUCTURE

This present research investigates an influence of two fly ashes (lignite fly ash and biomass ash) on strength development in blended cement admixed soft clay. The strength development is explained based on the microstructural observation via a scanning electron microscope (SEM) and thermal gravimetry analysis (TGA). It is found from the strength test results that for a particular water content, cement content and curing time, the strength increases with fly ash content up to 25% dry weight of cement. SEM photos and TGA results show that the strength of the blended cement admixed clay is controlled by water content and cement content, reflecting the pore volume and the cementitious products, respectively. SEM photos show that the reactivity of fly ash (pozzolanic reaction) is minimal as shown that fly ash particles are still smooth without the etchings on fly ash surface (indicating the precipitation in the pozzolanic reaction). For fly content less than 25% dry weight of cement, the role of fly ash is to disperse the large clay-cement clusters into smaller clusters, increasing the reactive surface and hence strength. The strength development is regardless of the type of fly ash. The input of fly ash in clay-cement mixture is thus regarded akin to the effect of an increase in cement content. As such, a novel parameter is introduced and designated as equivalent cement content. It is incorporated with the clay-water/cement ratio hypothesis for analyzing the strength development in the blended cement admixed clay. From the analysis, it is found that for clay-water contents in the

range of 1 to 2 times liquidity index, the strength development is dependent only upon the clay-water/cement ratio. This finding is in agreement with the TGA results that at a particular curing time, for the same clay-water content, the blended cement admixed clay samples, having the same clay-water/cement ratio but with different cement content and fly ash content, possess practically the same cementitious products. For all curing times tested, fly ash content is equivalent to 0.75 times cement content for all combinations of clay-water content and cement content. The interrelationship among clay-water/cement ratio, curing time and strength are finally proposed and verified.

,vcs

School of Civil Engineering

Academic Year 2009

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ และให้กำลังใจอย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านวิชาการ แนะนำ และตรวจทานเนื้อหาจนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้คำปรึกษา ขอขอบคุณบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดี และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

อภิชาติ สุดดีพงษ์

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง .....	ซ
สารบัญรูป .....	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฉ

### บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
2 ทัศนัวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์.....	4
2.2 โครงสร้างของดินเหนียว.....	5
2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	7
2.3.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์.....	7
2.3.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	8
2.3.3 ปฏิกริยาเมื่อผสมซีเมนต์กับดินและน้ำ.....	8
2.4 เถ้าลอย .....	10
2.4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและทางเคมีของเถ้าลอย .....	10
2.4.2 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเถ้าลอย .....	12
2.4.3 เทคนิคการทดแทนเถ้าลอยในงานคอนกรีต.....	15
2.4.4 คอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ .....	16

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

2.5	ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ .....	18
2.5.1	ปริมาณซีเมนต์และชนิดของซีเมนต์ .....	18
2.5.2	คุณสมบัติของดิน .....	22
2.5.3	ปริมาณดินเหนียวและชนิดของแร่ดินเหนียว .....	23
2.5.4	คุณสมบัติทางเคมีของดิน .....	25
2.5.5	การผสม .....	26
2.5.6	การบ่ม .....	29
2.5.7	สารผสมร่วม .....	31
2.6	เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค .....	32
2.6.1	การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope .....	32
2.6.2	การวิเคราะห์ Thermal Gravimetry Analysis, TGA .....	33
2.6.3	ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก .....	34
2.7	ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค .....	34
2.8	บทบาทของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน .....	35
3	วิธีดำเนินการวิจัย .....	40
3.1	บทนำ .....	40
3.2	การเก็บและการเตรียมดินตัวอย่าง .....	42
3.2.1	การเตรียมตัวอย่างดิน .....	42
3.2.2	คุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง (Basic Property) .....	42
3.3	ปูนซีเมนต์ .....	42
3.4	เกล็ดลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล .....	42
3.5	การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์เกล็ดลอย .....	43
3.6	การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว .....	44
3.6.1	นำตัวอย่างดินซีเมนต์เกล็ดออกจากฟิล์มพลาสติก .....	44
3.6.2	นำตัวอย่างดินซีเมนต์เกล็ดเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัดแกนเดียว .....	44
3.7	การทดสอบการอัดตัวคายนํ้าของดินซีเมนต์ .....	44
3.7.1	การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์เกล็ดลอย .....	44

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

3.7.2	การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ .....	44
3.8	ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง .....	44
3.9	การทดสอบโครงสร้างจุลภาค .....	45
3.9.1	การทดสอบ Thermal gravimetry Analysis.....	45
3.9.2	การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope.....	45
<b>4</b>	<b>ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล .....</b>	<b>46</b>
4.1	บทนำ .....	46
4.2	คุณสมบัติของดิน เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวลที่ศึกษา .....	46
4.3	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอย .....	48
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม .....	56
4.5	สมการทำนายกำลังอัดในพจน์ของตัวแปรควบคุม.....	59
4.6	การวิเคราะห์ด้านโครงสร้างจุลภาค .....	61
4.7	การตรวจสอบสมการทำนายกำลัง.....	64
<b>5</b>	<b>บทสรุป.....</b>	<b>73</b>
5.1	สรุปผลงานวิจัย .....	73
5.1.1	เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุกระจายตัว .....	73
5.1.2	แบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล.....	73
5.2	ข้อเสนอแนะในการใช้สมการและงานวิจัยต่อไป .....	74
	รายการอ้างอิง .....	75
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	80
	ประวัติผู้เขียน .....	85

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชีวมวล และเถ้าลอยถ่านหิน.....	3
2.1 ออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	7
2.2 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	8
2.3 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 .....	11
2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2533 ถึง 2541 .....	12
2.5 ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C-618.....	13
2.6 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง .....	15
2.7 กำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่อายุบ่ม 1 3 7 14 และ 28 วัน .....	22
2.8 เครื่องมือที่ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างดิน .....	32
3.1 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง .....	41
4.1 พารามิเตอร์ $A$ $B$ และ $k$ ของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินและ เถ้าชีวมวลที่อายุบ่มต่างๆ .....	52
4.2 $\text{Ca(OH)}_2$ ของดินซีเมนต์ที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ เท่ากับ 12 อายุบ่ม 28 วัน .....	63
4.3 $\text{Ca(OH)}_2$ ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อ ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 4 และ 12 อายุบ่ม 28 วัน .....	64
4.4 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลอง และจากการวัด .....	65
4.5 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลองและจากการวัด.....	69

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การกระจายของช่องว่างในเม็ดดิน .....	5
2.2 การจัดเรียงตัวของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน .....	6
2.3 โครงสร้างของดินเหนียว .....	6
2.4 Scanning Electron Microscope (SEM) ถ้าวาลอย (ขยาย 3,000 เท่า).....	14
2.5 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Sandy Loam.....	18
2.6 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Silty Clay .....	19
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์กับกำลังอัดของดินผสมซีเมนต์ .....	19
2.8 เปรียบเทียบกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Soil 2a-6) และ Silty Clay Loam (Soil 4d) ผสมซีเมนต์ประเภท 1 และประเภท 3 เมื่อผสมเสร็จแล้วทดสอบทันที .....	20
2.9 ขอบเขตปฏิสัมพันธ์ของดินเหนียวผสมซีเมนต์ .....	21
2.10 กราฟกำลังอัดแกนเดียวสัมพันธ์กับปริมาณซีเมนต์.....	21
2.11 อิทธิพลของวัสดุที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ .....	23
2.12 อิทธิพลของปริมาณดินเหนียวต่อค่า Modulus of Elasticity ของดินซีเมนต์ .....	24
2.13 อิทธิพลของแร้ดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 8 เปอร์เซ็นต์ .....	24
2.14 อิทธิพลของแร้ดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ .....	25
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่า pH ของดินผสมซีเมนต์ ในอัตราส่วน 1 : 10 .....	26
2.16 ผลของระยะเวลาที่ใช้ผสมต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์.....	27
2.17 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้ระยะเวลา การบดอัดนานขึ้น .....	28
2.18 อิทธิพลของความหนาแน่นต่อกำลังอัดของดินที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน .....	29
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิที่ใช้บ่มดินซีเมนต์ .....	30
2.20 อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์.....	30



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดอายุบ่ม 60 วัน อัตราส่วนแทนที่ 30 เปอร์เซนต์ .....	31
2.22 อนุภาคเถ้าลอยหยาบ (a) อายุบ่ม 28 วัน (b) อายุบ่ม 90 วัน .....	35
2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผล.....	36
2.24 การอัดตัวคายนํ้าของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมซีเมนต์ เปรียบเทียบกับ ดินเหนียวกรุงเทพไร้พันธะเชื่อมประสาน .....	37
2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียว ไร้พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวซีเมนต์.....	38
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน .....	40
3.2 วิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer).....	43
4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวล.....	47
4.2 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า.....	47
4.3 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินที่อายุบ่ม 28 วัน.....	48
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณเถ้าลอย ของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน .....	49
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณเถ้าลอยของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล.....	50
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณนํ้าในดินต่อ ปริมาณปูนซีเมนต์ (เถ้าลอยถ่านหิน).....	53
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณนํ้าในดินต่อ ปริมาณปูนซีเมนต์ (เถ้าชีวมวล) .....	53
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินซีเมนต์ เถ้าลอยถ่านหินที่อายุบ่ม 28 วัน .....	54
4.9 การอัดตัวของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน.....	55
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม .....	
ของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน .....	57
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของ ดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล.....	58

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม ภายใต้สภาวะตัวแปรต่างๆและการ Normalization.....	59
4.13 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า ของคินซีเมนต์ อัตราส่วนปริมาณน้ำในคินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 4 .....	62
4.14 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า ของคินซีเมนต์ อัตราส่วนปริมาณน้ำในคินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 12 .....	63
4.15 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของคินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน ที่อายุบ่ม 120 วัน ( $w_c = 89\%$ $C = 30\%$ $F = 25\%$ ).....	64
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดจากการทำนายกับกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบ ของคินซีเมนต์เถ้าชีวมวล.....	72

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดและอายุบ่มของดิน
ACI	=	American Concrete Institute
ASTM	=	American Society for Testing Material
Å	=	Angstrom
B	=	ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของดิน
CAH	=	Calcium aluminate hydrate
Ca(OH) <sub>2</sub>	=	Calcium hydroxide
C	=	Cement content
CAH	=	Calcium Aluminate Hydrate
CFA	=	Classified fly ash
CH	=	ดินเหนียวที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูง
CSH	=	Calcium silicate hydrate
D	=	อายุบ่ม
<i>e</i>	=	อัตราส่วนโพรง (Void ratio)
E	=	พลังงานการบดอัด (Energy)
F	=	Fly ash content
H	=	ปริมาณ Ca(OH) <sub>2</sub> จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่อัตราส่วนการแทนที่ใดๆ
<i>k</i>	=	ตัวแปรประสิทธิภาพของเถ้าลอย
LI	=	ดัชนีสภาพความเหลว (Liquidity Index)
LL	=	ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit)
LOI	=	Loss on Ignition
<i>w<sub>c</sub></i>	=	ปริมาณน้ำ (Moisture Content)
OFA	=	Original fly ash
OWC	=	ปริมาณน้ำเหมาะสม (Molding water content)
PC	=	Portland cement
PI	=	ดัชนีสภาพพลาสติก (Plastic Index)
PL	=	ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit)

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$q_u$	=	กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength)
SEM	=	Scanning Electron Microscope
SL	=	พิกัดหดตัว (Shrinkage Limit)
$T$	=	ปริมาณ $\text{Ca(OH)}_2$ ของดินซีเมนต์
TGA	=	Thermal Gravimetry Analysis

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญปัญหา

ในปัจจุบันการออกแบบและการก่อสร้างโครงสร้างสาธารณูปโภค เช่น ถนน และฐานราก สะพาน บนชั้นดินเหนียวอ่อนมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายตัวของชุมชนและแหล่งอุตสาหกรรม สำหรับประเทศไทยชั้นดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยามีประสบปัญหาทางด้านวิศวกรรมปฐพี พื้นที่บริเวณนี้ถูกปกคลุมด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนามีกำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำ ปริมาณความชื้นสูง และการอัดตัวสูง เมื่อมีการก่อสร้างบนชั้นดินนี้ ชั้นดินจะเกิดการอัดตัวคายน้ำ เกิดการทรุดตัวและการเสียรูปด้านข้างอย่างมากในระหว่างและหลังการก่อสร้าง เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งคือ เทคนิคการผสมลึก (Deep mixing technique) ซึ่งเป็นการเพิ่มพันธะเชื่อมประสานให้กับดินโดยสารเคมี (ปูนซีเมนต์และปูนขาว เป็นต้น) เทคนิคการปรับปรุงดินนี้เป็นการสร้างเสาเข็มในชั้นดินเหนียวอ่อน เพื่อเปลี่ยนจากชั้นดินเหนียวอ่อนมาเป็นชั้นดินผสม (Composite ground) ซึ่งมีความต้านทานการอัดตัวและกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม

ปูนซีเมนต์นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน เนื่องจากหาได้ง่ายในประเทศไทย แต่ในการปรับปรุงคุณภาพดินในปริมาณที่มากต้องใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูง เพื่อเป็นการลดต้นทุนของการก่อสร้าง เราจำเป็นต้องลดปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยการแทนที่ด้วยวัสดุอื่นที่มีราคาต่ำ ใกล้เคียงเป็นวัสดุที่เหลือ (Byproduct) จากการเผาไหม้ของถ่านหินจัดเป็นวัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ในงานวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย (Mindess, 1996; Mitsui et al., 1994; Igarashi et al., 1996) ปัจจุบันถ่านหินเริ่มมีราคาสูงขึ้น ถ่านหินที่น่าจะนำมาทดแทนถ่านหินได้แก่ ถ่านชีวมวล (Biomass ash) ซึ่งมีปริมาณมากและมีราคาต่ำเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ถ่านชีวมวลเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาไหม้ของวัสดุธรรมชาติ เช่น เปลือกไม้ ชานอ้อย แกลบ เป็นต้น งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการใช้ถ่านชีวมวลและถ่านชีวมวลในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนร่วมกับปูนซีเมนต์ โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุม (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณถ่านชีวมวล และอายุบ่ม) ซึ่งงานวิจัยนี้เรียกรวมถ่านทั้งสองชนิดว่าถ่านชีวมวล และสร้างสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ถ่านชีวมวล ในพจน์ของอัตราส่วน ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณถ่านชีวมวล ปริมาณความชื้น และอายุบ่ม

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการพัฒนากำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลอย ถ่านหิน และเถ้าชีวมวล โดยพิจารณาอิทธิพลของตัวแปรควบคุม (ปริมาณความชื้น ปริมาณ ปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และอายุบ่ม)

1.2.2 เพื่อสร้างสมการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลอย

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล โดยแปรผันตัวแปรควบคุม รวมถึงการสร้างสมการทำนายกำลังอัดในพจน์ของตัวแปรควบคุม โดย ดินที่ใช้เป็นดินเหนียวกรุงเทพ เก็บจากเขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ที่ความลึก 3.0 ถึง 4.0 เมตร ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรีชา้าง เถ้าลอยถ่านหินจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เถ้าชีวมวลจากบริษัทไทยเพาเวอร์โอเพอร์เลต จำกัด (TPO) อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชีวมวล เปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของ เถ้าลอยถ่านหินจากแม่เมาะ แสดงดังตารางที่ 1.1

การศึกษานี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1.3.1 การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่างและสารเชื่อมประสาน

1.3.2 การศึกษากำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลอย 2 ชนิด คือ เถ้าลอย ถ่านหิน และเถ้าชีวมวล โดยผสมดินเข้ากับปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วน 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ของ น้ำหนักดินแห้ง ผสมเถ้าลอยโดยใช้เทคนิคการผสมเพิ่มเป็น 0 10 15 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ของ น้ำหนักปูนซีเมนต์ ในแต่ละอัตราส่วนของการผสมปูนซีเมนต์ แปรผันค่า Liquidity index (LI) ของ ดิน 3 ค่า (1.0 1.5 และ 2.0) แล้วทำการทดสอบหาลำดับอัดแกนเดียว เมื่อครบอายุบ่ม 7 14 28 60 90 และ 120 วัน และทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.3.3 สร้างสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวลในพจน์ ของตัวแปรควบคุม

1.3.4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าลอยโดยการดูภาพขยายโดยใช้ เครื่องมือ Scanning Electron Microscope และการหาผลิตภัณฑ์ไฮเครชันด้วยเครื่องมือ Simultaneous Thermal Gravimetry Analyzer เพื่ออธิบายพฤติกรรมการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ เถ้าลอย

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชีวมวล เถ้าลอยถ่านหิน และส่วนผสมเชื้อเพลิงชีวมวลของเถ้าชีวมวล

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าชีวมวล	เถ้าลอยถ่านหิน (Sinsiri et al., 2006)
SiO <sub>2</sub>	74.12%	45.63%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.57%	24.59%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.88%	11.26%
CaO	1.54%	12.15%
MgO	5.91%	2.87%
SO <sub>3</sub>	3.33%	1.57%
Na <sub>2</sub> O	1.71%	0.07%
K <sub>2</sub> O	0.50%	2.66%
LOI	7.45%	1.23%
องค์ประกอบเชื้อเพลิงชีวมวลของเถ้าชีวมวล		
แกลบ	36%	
เปลือกไม้	24%	
ไม้อัด	6%	
เนื้อไม้ยูคาลิปตัสสับ	23%	
เปลือกผลไม้	11%	

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เมื่องานวิจัยแล้วเสร็จประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับเป็นดังนี้

1.4.1 ได้เข้าใจการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวล เมื่อแปรผันตัวแปรควบคุม ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และอายุบ่ม

1.4.2 ได้สมการทั่วไปสำหรับทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย

## บทที่ 2

### ปรัทศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์

ดินเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีอยู่อย่างมากมาย ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดและสภาพแวดล้อม จึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความเหมาะสมกับงานแต่ละประเภท แนวความคิดเรื่องการปรับปรุงดินให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้นโดยการผสมวัสดุเชื่อมประสานได้เกิดขึ้นเป็นเวลาหลายพันปีมาแล้ว ได้มีการนำดินมาผสมกับปูนขาวหรือวัสดุพอซโซลาน เพื่อให้ค่าดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity index, PI) ของดินลดลง ซึ่งทำให้ดินรับแรงอัดได้ดีขึ้น หลังจากนั้น ได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องมาหลายศตวรรษ (Tessel et al., 1979)

ในประเทศสวีเดน ศาสตราจารย์ Bengt Broms ได้ใช้เสาเข็มปูนขาวในงานฐานรากและงานโครงสร้าง (Broms and Boman, 1975) เทคนิคนี้ได้เริ่มต้นใช้ในประเทศญี่ปุ่นในปลายปี ค.ศ. 1970 (Okumura and Terashi, 1975; Terashi et al., 1979; Kawasaki et al., 1981; Suzuki, 1982) DJM Research Group (1984); Chida (1982); Miura et al. (1986) ได้รายงานความสำเร็จของการประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานวิศวกรรมปฐพี ในปี ค.ศ. 1980 และ 1982 หลังจากการประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ไม่นานนัก นักวิจัยและวิศวกรหลายท่านได้สร้างทฤษฎีวิธีการวิเคราะห์และวิธีการออกแบบ

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้ามีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง ค.ศ. 1930 ถึง 1939 นักวิจัยชาวสหรัฐอเมริกาได้เริ่มศึกษาการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต Davis et al. (1937) จากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต ในปี ค.ศ. 1948 ได้มีการใช้เถ้าลอยในการก่อสร้างเขื่อน Hungry Horse ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 ถึง 1979 ได้เกิดวิกฤตการณ์น้ำมันทำให้ต้องใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงและมีผลให้ปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น และการศึกษาเพื่อสร้างความเข้าใจในปฏิกิริยาเคมีของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์จึงเกิดขึ้นในช่วงเวลานั้นจนถึงปัจจุบันการนำเถ้าลอยในงานคอนกรีตได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อเป็นการลดต้นทุนของคอนกรีตและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดเถ้าลอยทิ้ง นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาการนำเถ้าลอยลงในตะกอนแม่พิมพ์มาผสมในดินสำหรับงานถนน เช่น อนิรุทธ์ ธงไชย และ สุเทพ นิ่มนวล (2530); สมชัย กกก้าแหง (2535); Rhee and Yong-Heun (1982) นักวิจัยเหล่านี้พบว่ากำลังอัดของซีเมนต์ผสมเถ้าลอย มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น (ในช่วง 0 ถึง 15%) ระยะเวลาการบ่มและค่าความหนาแน่นแห้ง

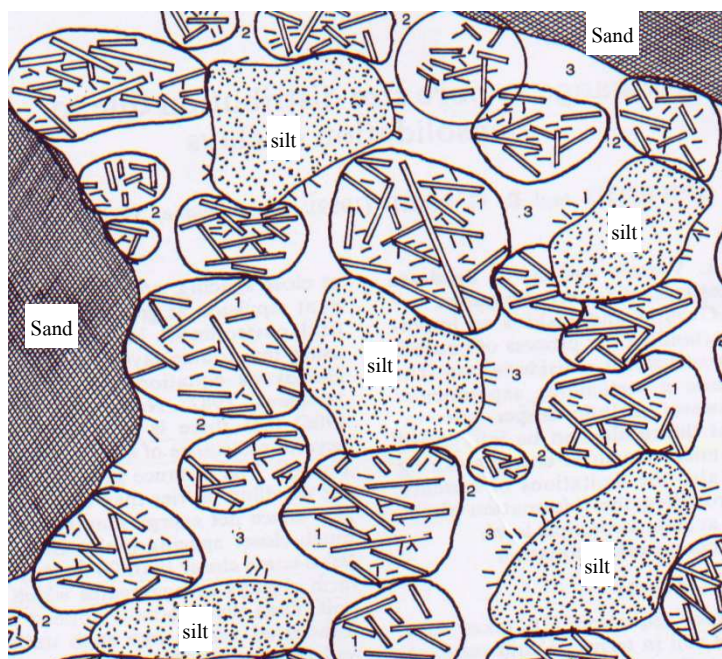


สูงสุดมีแนวโน้มลดลงในขณะที่ค่า Liquid limit Plasticity limit และ Plasticity index มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย

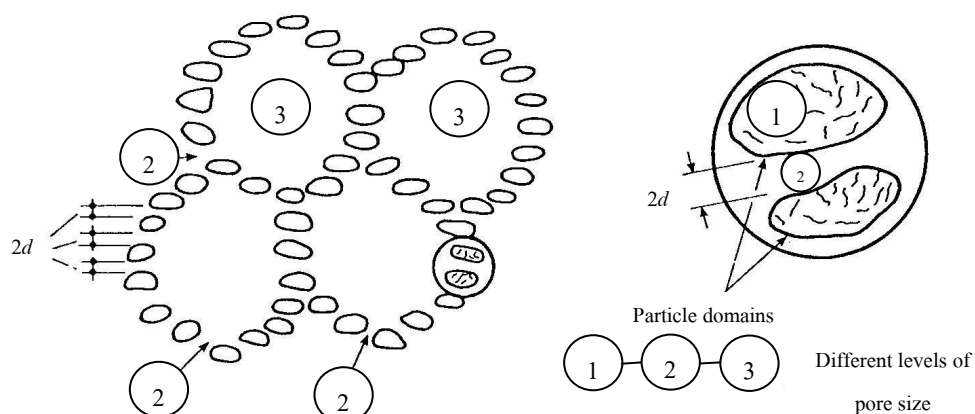
## 2.2 โครงสร้างของดินเหนียว

Nagaraj et al. (1990) สรุปผลการทดลองของ Griffith and Joshi (1989) และแสดงแบบจำลองโครงสร้างของเม็ดดินละเอียดโดยอาศัยทฤษฎีกลุ่มก้อนดิน (Cluster theory) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 ซึ่งขนาดของช่องว่างมีด้วยกัน 3 ระดับ คือ

- ก. ช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเหนียวในก้อนดิน (Cluster) มีขนาดน้อยกว่า  $20\text{\AA}$
- ข. ช่องว่างระหว่างก้อนดินสองก้อน มีขนาดอยู่ระหว่าง  $20\text{\AA}$  ถึง  $200\text{\AA}$
- ค. ช่องว่างขนาดใหญ่ภายในกลุ่มของก้อนดิน มีขนาดใหญ่มากกว่า  $200\text{\AA}$

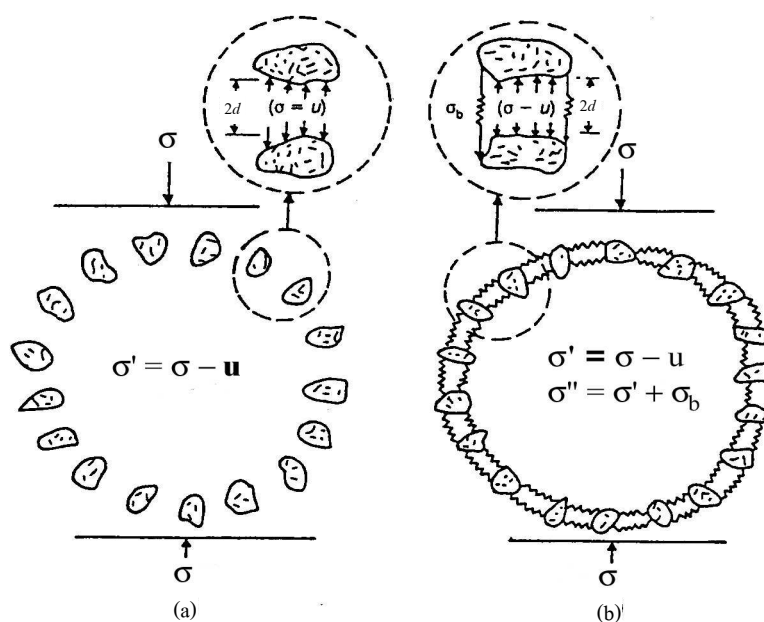


รูปที่ 2.1 การกระจายของช่องว่างในเม็ดดิน (Nagaraj et al., 1990)



รูปที่ 2.2 การจัดเรียงตัวของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (Nagaraj, 1990)

Nagaraj et al. (1990); Horpibulsuk et al. (2003) ได้เสนอแบบจำลองโครงสร้างของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ แสดงดังรูปที่ 2.3 รูปที่ 2.3 (a) เป็นโครงสร้างของดินที่ปราศจากพันธะเชื่อมประสาน (Cementation) เมื่อผสมซีเมนต์กับดินพันธะเชื่อมประสานจะเชื่อมแฟบริกเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (b)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของดินเหนียว (a) ดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (Nagaraj, 1990)

(b) ดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน (Horpibulsuk et al., 2003)

## 2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

**2.3.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์** ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยส่วนผสมที่สำคัญคือ (1) Catcareous material ได้แก่หินปูน (Limestone) และดินสอพอง (Chalk) (2) Argillaceous material ได้แก่ Silica ซึ่งอยู่ในรูปของดินเหนียว (Clay) และดินดาน (Shale) (3) Iron oxide material ได้แก่แร่เหล็ก (Iron) หรือ คีลาแลง (Laterite) เมื่อทำการเผาวัสดุดังกล่าวทั้งหมดรวมกันในหม้อเผา ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่คือ ออกไซด์หลักได้แก่  $\text{CaO}$   $\text{SiO}_2$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักซีเมนต์ และออกไซด์รองได้แก่  $\text{MgO}$   $\text{NaO}$   $\text{TiO}_2$  และ  $\text{P}_2\text{O}_5$  ปริมาณออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงในตารางที่ 2.1 ออกไซด์หลักจะรวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

(ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2536)

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60-67
$\text{SiO}_2$	17-25
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3-8
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.5-0.6
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1-5.5
$\text{Na}_2 + \text{K}_2\text{O}$	0.5-1.3
$\text{TiO}_2$	0.1-0.4
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.1-0.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2536)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
ไดแคลเซียม ซิลิเกต	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
ไตรแคลเซียม อลูมินา	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

### 2.3.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1) ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไปได้แก่ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาคสีเขียว

2) ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับใช้ในงานที่เกิดความร้อนปานกลาง ทนซัลเฟตได้ปานกลาง ปัจจุบันไม่มีผลิตในประเทศไทย

3) ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดสูงในระยะแรก เพราะมีความละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว หรือถอดแบบในเวลาอันสั้นได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราพญานาคสีแดง ข้อควรระวังคือ ไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดสูงมากในช่วงต้น อาจก่อให้เกิดการแตกร้าวได้

4) ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ได้ถูกพัฒนาครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ ในประเทศไทยไม่มีการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ปัจจุบันนี้ถูกทดแทนโดยการใช้ปอร์ตแลนด์ธรรมดาผสมกับเถ้าลอย

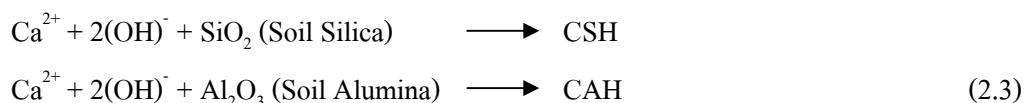
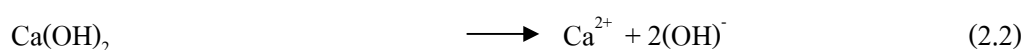
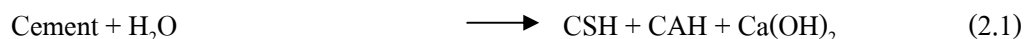
5) ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีไตรแคลเซียม ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ต่ำ จึงทำให้มีการพัฒนากำลังอัดช้า ทำให้เกิดความร้อนต่ำกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทธรรมดาได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตราช้างฟ้า ตราปลาฉลาม

### 2.3.3 ปฏิกิริยาเมื่อผสมปูนซีเมนต์กับดินและน้ำ

เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับดินและน้ำจะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้ดินมีกำลังเพิ่มขึ้น ซึ่งได้มีการศึกษา และบันทึกไว้โดยนักวิจัยหลายท่าน

Davidson (1961) ได้กล่าวไว้ว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมซีเมนต์กับดินเหนียวชั้น จะเกิดการลดลงของค่า Plasticity ของดินซึ่งน่าจะมาจากการแยกตัวของ อีออนของแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) ในระหว่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เม็ดดินยึดเกาะกันเป็นก้อน เนื่องจากแรงยึดเกาะทางเคมีที่มีอยู่ในดิน หรือการยึดเกาะกันระหว่างผิวของอนุภาคซีเมนต์ที่อยู่ใกล้กัน

Lambe et al. (1959) ได้ศึกษาการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ และอธิบายไว้ว่า ซีเมนต์ เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากผลึกของ Tricalcium Silicate Dicalcium Silicate Tricalcium Aluminate และ Tetracalcium Aluminate Ferrite เมื่อซีเมนต์ผสมเข้ากับดินและน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา จะได้สารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH) Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Hydrated Lime หรือ Calcium Hydroxide ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) แยกตัวออกมา CSH และ CAH มีคุณสมบัติเชื่อมประสานที่ได้จากปฏิกิริยาหลักของซีเมนต์ นอกจากนี้ Hydrated Lime ที่ได้จะแตกตัวเป็นอีออนของแคลเซียมเข้าไปทำปฏิกิริยากับ Silica และ Alumina ในแร่ดินเหนียว เกิดสารประกอบ CSH และ CAH ขึ้นมาอีก ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์และน้ำในมวลดิน จะทำให้ค่า pH ในดินเพิ่มขึ้น ซึ่งเชื่อว่าการเพิ่มขึ้นของ pH เนื่องจากการแตกตัวของ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  หรือ Hydrated Lime ทำให้ Silica และ Alumina ซึ่งเป็นแร่ประกอบในดินเหนียวเกิดการแตกตัวเข้าทำปฏิกิริยากับอีออนของแคลเซียม ได้วัสดุเชื่อมประสานขึ้นอีก ปฏิกิริยานี้จะต้องใช้ระยะเวลานานกว่าจะสมบูรณ์ สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์จะเป็นไปดังสมการที่ 2.1 2.2 และ 2.3



การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เกิดจากการที่ซีเมนต์ผสมกับน้ำแล้วเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และผลของปฏิกิริยาจะได้สารประกอบ CSH CAH และ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไป โดย  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  จะแตกตัวออกเป็น  $\text{Ca}^{2+}$  และทำปฏิกิริยากับ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ซึ่งเป็นแร่ในดินเหนียวได้สารประกอบ CSH และ CAH ออกมาอีก สารประกอบเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานทำให้อนุภาคของเม็ดดินเกิดการรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีกำลังสูงขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 เรียกว่า Primary Reaction และสมการที่ 2.3 เรียกว่า Secondary Reaction

## 2.4 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหิน หรือเถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized fuel ash) ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงาน โรงไฟฟ้าถ่านหิน มีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาล มีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกาและอะลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร  $\text{Ca(OH)}_2$  และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Cementitious) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาการเผา ดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน

หน่วยงานวิจัยสองหน่วยงานกำหนดถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงถึงของเถ้าลอยคือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Material (ASTM) ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยตาม ASTM C-618 และ ASTM C-593 เพื่อควบคุมคุณภาพและคัดเลือกเถ้าลอยมาใช้ในการคอนกรีต แต่จากการศึกษาของ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล สุรเชษฐ์ จิงเกษมโชคชัย และ วราภรณ์ คุณวานากิจ (2542) พบว่าคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะเป็นได้ทั้ง Class F และ Class C ดังนั้นการจำแนกประเภทของเถ้าลอยโดยอาศัยหลักเกณฑ์ดังกล่าวอาจเกิดข้อโต้แย้งได้ คณะอนุกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุ คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ จึงริเริ่มที่จะดำเนินการร่างมาตรฐานเพื่อใช้กับเถ้าลอยและการออกแบบคอนกรีตสำหรับประเทศไทยขึ้น

### 2.4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและทางเคมีของเถ้าลอย

#### 1) ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

American Society for Testing and Material (1995) แนะนำให้ทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี โดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหิน ขบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้เผา มาตรฐาน ASTM C-618 แยกเถ้าลอยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมีปริมาณส่วนประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็กในการจำแนก Class โดยที่ Class F และ Class C ผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวด้วย สำหรับร้อยละ

ของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) กำหนดไม่เกิน 5 เพราะซัลเฟอร์ มีผลเสียต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัด ระยะเวลาที่ตัวได้ และยังมีผลเสียต่อกอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟต (Sulfate Attack)

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618

องค์ประกอบทางเคมี	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) min%	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) max%	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น max%	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition (LOI)) max%	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) max%	1.5	1.5

ความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน ซึ่งสำหรับ เถ้าลอย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition (LOI)) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอย หากมี LOI มาก การควบคุมในด้าน Air entrainment ของคอนกรีตสดจะทำให้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่ม ในคอนกรีตโดยทั่วไปแล้ว เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 มาก ปริมาณอัลคาไลน์ (Alkali) ในรูปของโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$  Equivalent) มากที่สุดไม่เกิน ร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะเถ้าลอยที่มีปริมาณ  $\text{CaO}$  สูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali-aggregate ขึ้นได้ ถ้าต้องการนำเถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลน์ มากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ พ.ศ. 2431 ถึง 2541 คุณสมบัติโดยทั่วไปมีปริมาณออกไซด์ของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 70 ปริมาณ  $\text{CaO}$  จะสูงมากกว่าร้อยละ 10 ปริมาณ LOI ต่ำมาก คือน้อยกว่าร้อยละ 1 นอกจากนี้ข้อที่น่าสังเกตคือ ปริมาณ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  จะสูงกว่าแหล่งอื่น

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2533 ถึง 2541

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	LOI
2533	37.8	20.5	14.2	17.4	3.3	0.9	2.1	3.9	0.8
2534	42.8	23.3	14.0	10.5	2.4	0.8	2.3	3.9	0.7
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	2.8	1.0	2.6	3.1	0.5
2536	43.1	20.0	13.2	13.0	2.7	1.3	2.4	2.6	0.6
2537	52.8	18.0	8.5	13.3	1.4	0.9	2.0	2.8	0.3
2538	40.6	22.8	12.8	14.4	2.5	0.7	2.0	2.8	0.9
2539	40.6	23.6	13.0	13.0	2.5	1.2	3.0	2.4	0.7
2540	41.5	28.1	12.3	10.0	1.2	0.6	3.3	2.0	0.8
2541	37.3	22.1	14.4	11.4	2.7	1.1	2.7	2.5	0.1

## 2) ส่วนประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอย (Mineralogical composition)

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล สุรเชษฐ์ จิงเกษมโชคชัย และ วราภรณ์ คุณวานากิจ (2542) เมื่อถ่านหินถูกเผา และมีการเย็นตัวของเถ้าลอย การเผาจะทำให้องค์ประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอยด้านการเกิดผลึก (Crystalline) แตกต่างกัน สำหรับเถ้าลอยลิกไนต์จะมีความเป็น Noncrystalline (glass) มากกว่าร้อยละ 90 อันเป็นส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่ก็ยังคงมีองค์ประกอบของ Crystalline จำพวก Quartz Anhydrite Calcite Hematite Mullite ซึ่งเกี่ยวข้องการเกิดปฏิกิริยา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction จะพบว่าเถ้าลอยจากถ่านลิกไนต์จะมีองค์ประกอบของ Crystalline น้อยกว่าเถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัสและแอนทราไซต์

### 2.4.2 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเถ้าลอย

คุณสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของเถ้าลอย สามารถเห็นได้จากพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม (Fly ash concrete) แต่คุณสมบัติของเถ้าลอยอาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากกระบวนการเผาไหม้ เช่นมีการเผาน้ำมันเตาร่วมกับการเผาถ่านหิน มีการเติมวัสดุบางประเภทเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และลดการกัดกร่อน ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของเถ้าลอยเพื่อนำไปใช้งาน อาศัยข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C-618 ดังตารางที่ 2.5

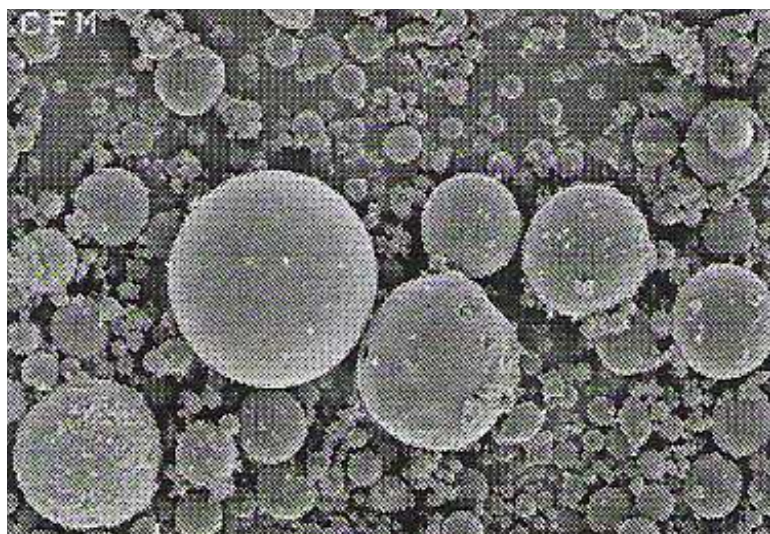


ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C-618

ข้อกำหนดด้านกายภาพ	Class of Fly Ash	
	F	C
ความละเอียด : ส่วนข้างตะแกรงเบอร์ 325 หลังการร่อนแบบเปียก Max%	34	34
หาดัชนีกำลัง : โดยผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์		
7 วัน Min% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
28 วัน Min% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
ความต้องการน้ำ : Max% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	105	105
ความอยู่ตัว : การขยายตัวหรือหดตัวโดยวิธี Autoclave Max%	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity requirement)		
-ความหนาแน่น Max จากค่าเฉลี่ย%	5	5
-ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 Max จากค่าเฉลี่ย%	5	5
Multiple Factor (ผลคูณระหว่าง %LOI กับ % ของปริมาณความชื้นที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325)	255	-
Drying Shrinkage ของแท่งมอร์ต้าที่ 28 วัน Max% ที่แตกต่างจากตัวควบคุม	0.03	0.03

## 1) รูปร่างของเถ้าลอย

อนุภาคเถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลม บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ่านหินซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม เมื่อถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลม ดังรูปที่ 2.4 เมื่อเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบและทำให้คอนกรีตแข็งแรงต่อการเทซึ่งคอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้ แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้



รูปที่ 2.4 Scanning Electron Microscope (SEM) เถ้าลอย (ขยาย 3000 เท่า)

## 2) ความละเอียด (Fineness)

ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งจะใช้การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C-430 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 มิลลิเมตร) โดยวิธีร่อนเปียก (Wet Sieving) เนื่องจากเถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่า นั่นคือส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำปฏิกิริยาได้มีประสิทธิภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังจะบอกขนาดของอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยวิธีของเบลน (Blaine specific surface-area technique) ตามมาตรฐาน ASTM C-204 หรือวิธี Particle size analysis หรือวิธี Brunauer Emmett Teller (BET) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม การทดสอบเทอร์บิดิมิเตอร์ (Turbidimeter test) ตาม ASTM C-115 และการใช้ไฮโดรมิเตอร์ โดยการทดสอบทั้งสี่วิธีนี้อาจให้ค่าความละเอียดที่แตกต่างกันได้มาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการทดสอบ โดยผลการทดสอบขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และความพรุนของเถ้าลอยแต่ละอนุภาคเป็นอย่างมาก แต่จากการทดสอบเถ้าลอยจาก อำเภอ แม่เมาะ การบอกขนาดของอนุภาคโดยวิธีดังกล่าว ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

ชนิดตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ	ส่วนที่ค้ำบน ตะแกรงเบอร์ 325 (%)	สภาพให้อากาศ ซึมได้ (cm <sup>2</sup> /g)	ขนาดเฉลี่ย (mm)
ปูนซีเมนต์	3.14	4.7	3120	13.0
เถ้าลอย	2.02	37.4	2370	28.5

จะเห็นว่าเถ้าลอยมีปริมาณที่ค้ำบนตะแกรงสูงกว่าซีเมนต์ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ส่งผลให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารหน่วงเมื่อผสมร่วมกับซีเมนต์

### 3) การหาดัชนีกำลัง (Strength Activity Index)

ค่าดัชนีกำลังจะเป็นอัตราส่วนร้อยละของกำลังอัดเฉลี่ย (Compressive Strength) ของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C-311 เทียบกับมอร์ต้ามาตรฐานที่ไม่ผสมปอซโซลาน โดยกำหนดไว้ว่าไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้ามาตรฐาน ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

#### 2.4.3 เทคนิคการทดแทนเถ้าลอยในงานคอนกรีต

เทคนิคการผสมเถ้าลอยในคอนกรีตซึ่งสำคัญที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดและคุณสมบัติอื่น ๆ ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (Berry and Malhotra, 1980) มีสามวิธีดังนี้

1) ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน การทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยนั้นมีการทดแทนโดยน้ำหนักและการทดแทนโดยปริมาตร จากการทดลองพบว่าการทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 1 : 1 นั้น จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ในช่วงสามเดือนแรกต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่กำลังอัดเมื่ออายุหนึ่งปีจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา

2) ใช้เป็นมวลละเอียดเพิ่มในคอนกรีต การใช้เถ้าลอยเป็นมวลละเอียดเพิ่มในคอนกรีตเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มสารเชื่อมประสานในคอนกรีตซึ่งจะทำให้กำลังอัดตั้งแต่อายุสามเดือนขึ้นไปมีค่าเพิ่มมากขึ้น

3) ใช้ทั้งทดแทนปูนซีเมนต์และใช้เป็นมวลรวมละเอียดด้วย การทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยและใช้เถ้าลอยเป็นมวลรวมละเอียดเพิ่มด้วยนี้ หากต้องการให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีกำลังอัดในช่วงแรกเท่ากับคอนกรีตธรรมดา ปริมาณเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยรวมกันจะต้องมากกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตธรรมดา

#### 2.4.4 คอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ

##### 1) กำลังอัด

บุรชัย นัตรวิระ และ พิชัย นิमितยงสกุล (2538) ได้นำเถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะมาทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 28 60 และ 90 วันของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยแม่เมาะ โดยให้เถ้าลอยแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ เท่ากับร้อยละ 15 25 และ 35 และใช้อัตราส่วนผสมวัสดุซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 : 2.75 โดยน้ำหนัก การไหลของมอร์ต้ากำหนดที่ร้อยละ 105 ถึง 115 จากการทดลองพบว่ามอร์ต้าผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อายุเริ่มแรกจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังต่ำกว่ามอร์ต้าธรรมดา ค่ากำลังอัดในช่วงยาวจะมากกว่าค่ากำลังอัดของมอร์ต้าธรรมดา

วิศว จักรไพศาล และ ชัยโรจน์ จักรไพศาล (2540) ได้ทำการศึกษาและทดสอบคุณสมบัติของเถ้าลอยแม่เมาะที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง (High Performance concrete : คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง มีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็ว สามารถใช้งานได้สะดวกและมีคุณภาพดีกว่าคอนกรีตธรรมดา) โดยใช้วิธีวิเคราะห์การวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง (Thermalgravimetry Analysis, TGA) ซึ่งเป็นการทดสอบทางเคมีเพื่อหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ และหาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีผลต่อกำลังอัด จากนั้นนำผลที่ได้มาเป็นแนวในการหาปริมาณของเถ้าลอยแม่เมาะที่เหมาะสมเมื่อนำมาแทนปูนซีเมนต์ในคอนกรีต โดยตัวอย่างทดสอบจะเป็นคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ผสมด้วยเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปริมาณร้อยละ 0 ถึง 35 โดยน้ำหนักของปริมาณซีเมนต์ และใช้อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.26 ถึง 0.32 หรืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ระหว่าง 0.30 ถึง 0.50 ผลที่ได้จากการศึกษาและทดสอบพบว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีกำลังอัดที่สูงขึ้น เนื่องจาก (แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต) มีปริมาณเพิ่มขึ้นโดยปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย จะมีค่ามากกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ธรรมดาร้อยละ 5 ที่อายุบ่ม 28 วัน และร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 56 วัน แสดงว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดเพิ่มขึ้นตามเวลา นอกจากนั้นยังพบอีกว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีกำลังอัดดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันโดยตรงกับปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก และจากผลของการศึกษาจะได้ว่าปริมาณเถ้าลอยที่ใช้แทนปูนซีเมนต์ควรอยู่ระหว่างร้อยละ 15 ถึง 25 ของปูนซีเมนต์

##### 2) ความละเอียด

สมิตร ส่งพิริยะกิจ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2538) ได้ศึกษาถึงผลของความละเอียดของเถ้าลอยแม่เมาะที่มีผลต่อคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยเถ้าลอยที่ใช้แทนปูนซีเมนต์จะมี ความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 และ 35 ของน้ำหนัก

ปูนซีเมนต์และทำการทดสอบการก่อตัว การไหล และกำลังอัดที่ 1 3 7 14 28 60 และ 90 วัน จากผลการทดลองพบว่าการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์มีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น และค่าการไหลเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าการใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดมากขึ้นมีผลทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าพัฒนาเร็วขึ้น

ทิน เกตุรัตน์บวร ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ เอกภพ อังศุวัฒนา (2535) ได้นำเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาแยกด้วยเครื่อง Air Classifier และนำเถ้าลอยความละเอียดสูงซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.8 ไมครอน มาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 และ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อทำคอนกรีตกำลังสูงในการศึกษาจะใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อคงปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน ให้มีค่าเท่ากับ 0.26 และมีค่ายุบตัวที่ใกล้เคียงกันซึ่งมีค่ามากกว่า 5 เซนติเมตร ผลการทดสอบกำลังอัดพบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยละเอียดมาก ๆ ในอัตราส่วนร้อยละ 15 25 และ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทำให้กำลังอัดโดยรวมดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย โดยเริ่มให้กำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยตั้งแต่อายุ 17 วันขึ้นไป ซึ่งมีค่ากำลังอัดเทียบเป็นร้อยละ 113 ถึง 115 ของตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยที่อายุ 365 วัน

### 3) การต้านทานการกัดกร่อน

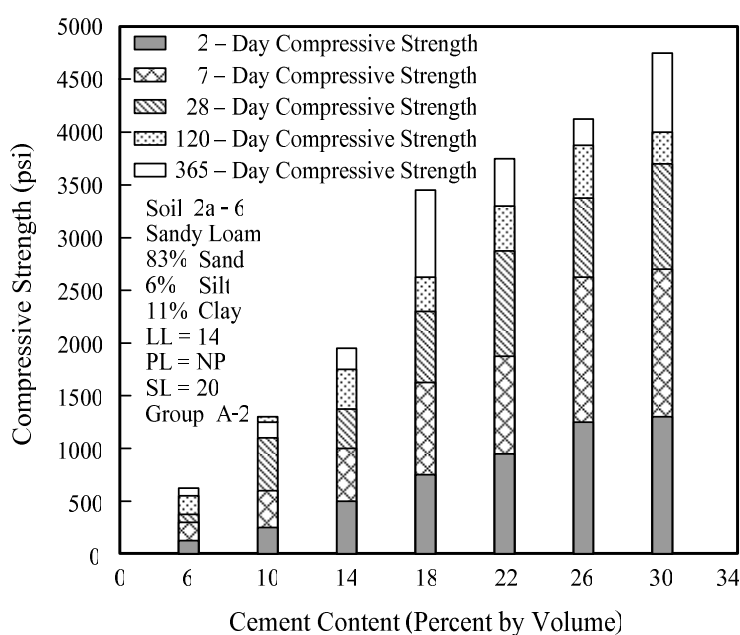
สมหมาย สว่างกิจ และคณะ (2535) ได้ทดลองนำเถ้าลอยจากประเทศสหรัฐอเมริกาและเถ้าลอยแม่เมาะมาผสมในปูนซีเมนต์มอร์ต้าในอัตราส่วนร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และกำหนดให้ค่าอัตราส่วนของน้ำต่อสารเชื่อมประสานมีค่า 0.50 ทำการหล่อเป็นก้อนทดสอบรูปลูกบาศก์ และนำไปแช่ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 100 มิลลิลิตรต่อลิตร วัดน้ำหนักที่หายไปในช่วงเวลา 7 และ 21 วัน ที่แช่ในกรด การทดลองพบว่าชนิดของเถ้าลอยไม่มีผลต่อการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตมากนัก และคอนกรีตที่มีเถ้าลอยผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดมากกว่าคอนกรีตธรรมดา

ทิน เกตุรัตน์บวร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2540) ได้นำเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาแยกออกเป็น 4 ขนาดด้วยเครื่องแยกขนาด (Air Classifier) แล้วนำไปผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักในมอร์ต้า ควบคุมให้มีการไหลแผ่อยู่ระหว่าง 101 ถึง 115 เพื่อทดสอบกำลังอัดและความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเป็นระยะเวลา 126 วัน ผลการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนพบว่าตัวอย่างมอร์ต้าที่ผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก สามารถต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าตัวอย่างที่มีเถ้าลอยผสมอยู่ร้อยละ 0 20 30 และ 40 เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยในขนาดเดียวกัน นอกจากนั้นยังพบว่าการใช้เถ้าลอยที่มีซิลิกาเฟอรไตรออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) น้อยกว่าจะสามารถทนต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าการใช้เถ้าลอยที่มีซิลิกาเฟอรไตรออกไซด์สูงกว่า

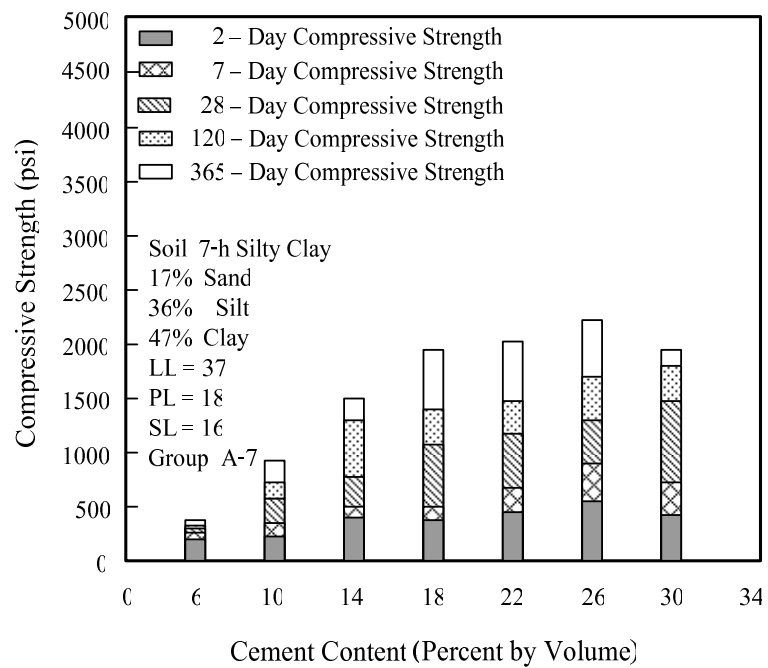
## 2.5 ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์

**2.5.1 ปริมาณซีเมนต์และชนิดของซีเมนต์** Ruenkairergsa (1982) อธิบายว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อคุณภาพของดินซีเมนต์ คือ ปริมาณซีเมนต์ เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น กำลังอัดของดินซีเมนต์ก็จะเพิ่มขึ้น และอัตราการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานของดินด้วย โดยดินซีเมนต์ที่มีมวลเม็ดหยาบมากกว่าจะมีค่าเพิ่มสูงกว่าดินซีเมนต์ที่มีมวลเม็ดละเอียดกว่า

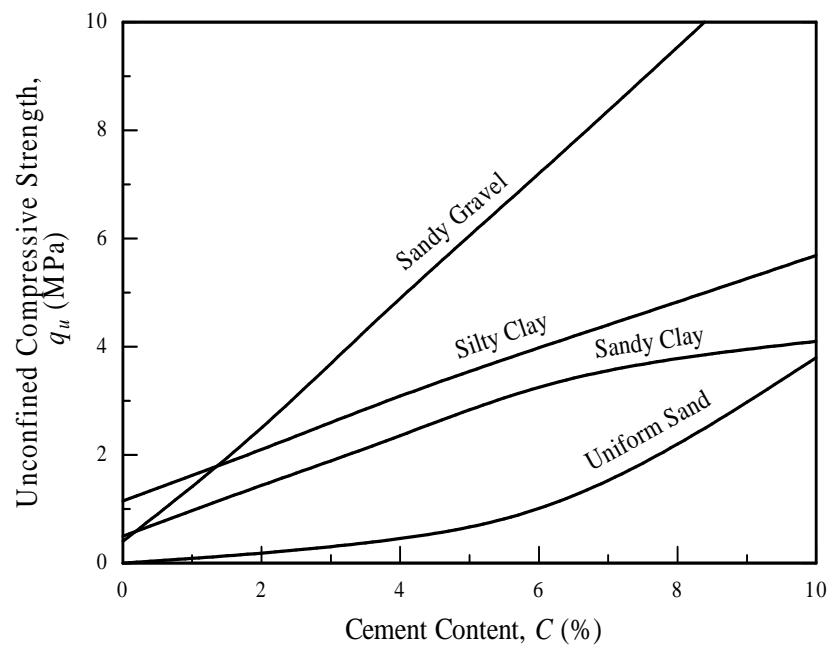
Felt (1955) ได้นำดิน Sandy Loam และ Silty Clay มาผสมกับซีเมนต์ โดยแปรผันปริมาณซีเมนต์ตั้งแต่ 6 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร นำมาทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 5 ค่า ตั้งแต่ 2 วัน ถึง 1 ปี ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสม และดินที่มีดินเหนียวในปริมาณสูงกว่าจะมีกำลังอัดต่ำกว่าดินที่มีดินเหนียวต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Metcalf (1977) ซึ่งสรุปว่า ปริมาณซีเมนต์มีผลโดยตรงกับกำลังอัดของดินซีเมนต์โดยเฉพาะกับดินเม็ดหยาบ โดยกำลังอัดของดินซีเมนต์จะแปรผันตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ แต่สัดส่วนการเพิ่มจะแตกต่างกันออกไปตามคุณสมบัติของดิน ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.7 นอกจากนี้ Felt (1955) ยังได้ทดลองหาอิทธิพลของซีเมนต์ประเภทหนึ่งและซีเมนต์ประเภทสามต่อกำลังอัดของดินสองชนิด คือ Sandy Loam และ Silty Clay Loam ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.8 และสรุปว่า ดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทสามมีกำลังอัดสูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มเดียวกัน



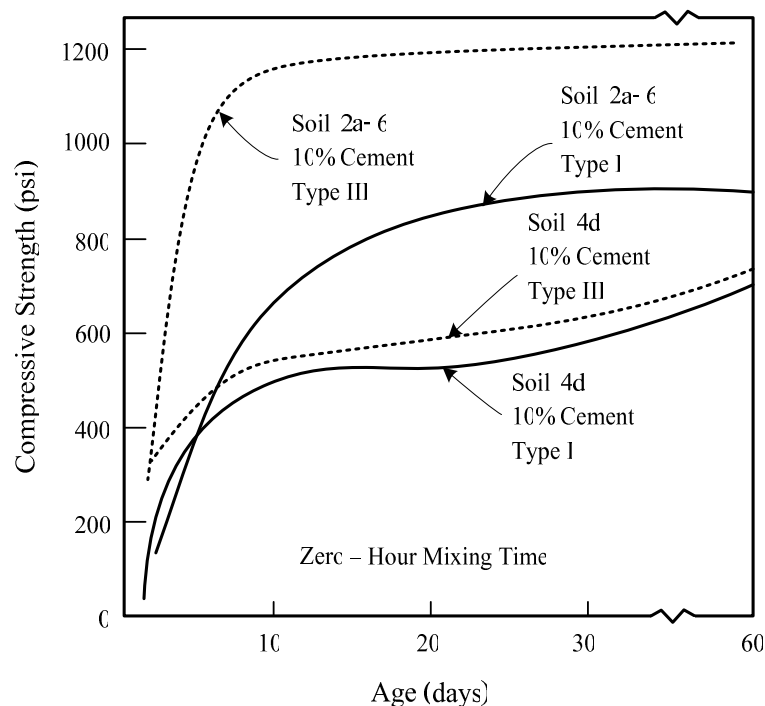
รูปที่ 2.5 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Felt, 1955)



รูปที่ 2.6 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อการกำลังอัดของดิน Silty Clay (Felt, 1955)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์กับกำลังอัดของดินผสมซีเมนต์ (Metcalf, 1977)

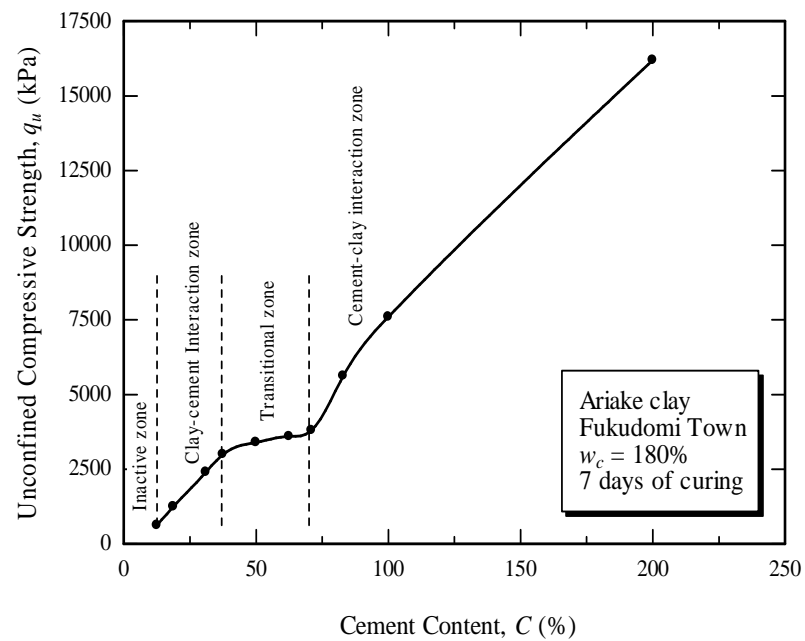


รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Soil 2a-6) และ Silty Clay Loam (Soil 4d) ผสมซีเมนต์ประเภท 1 และประเภท 3 เมื่อผสมเสร็จแล้วทดสอบทันที (Felt, 1955)

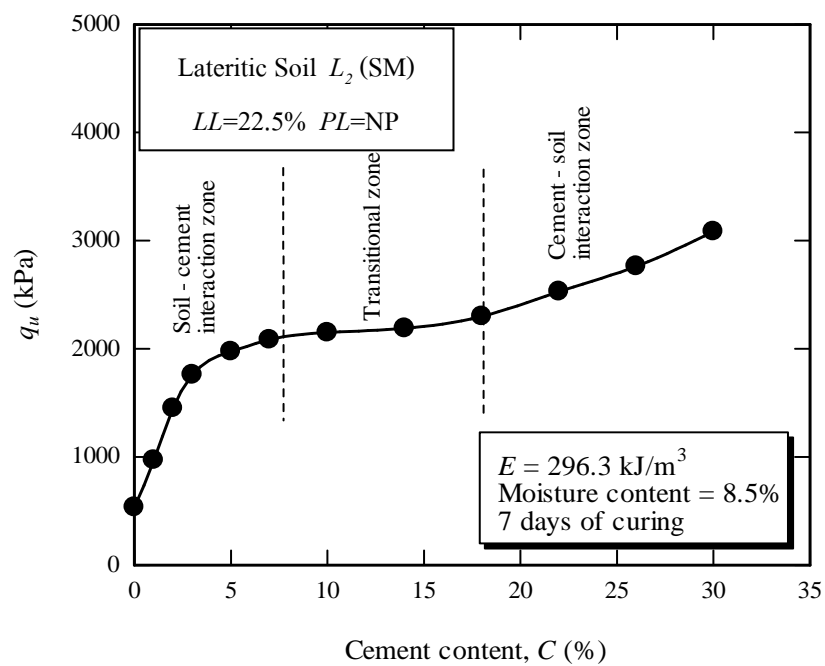
Horpibulsuk et al. (2003) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูง และพบว่าสำหรับดินซีเมนต์ที่อายุบ่มค่าหนึ่ง กำลังอัดของดินตัวอย่างแปรผันตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.9 กราฟของกำลังอัดแกนเดียว สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ช่วง ช่วงแรกซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำ ๆ เรียกว่า Clay-cement interaction zone ในช่วงนี้กำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ ช่วงที่สองกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าค่อนข้างคงที่ โชนนี้เรียกว่า Transitional zone และถัดจากช่วงนี้ไปเป็น Cement-clay interaction zone ซึ่งกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าสูงขึ้นอีก นอกจากนั้นยังพบอีกว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุบ่มค่าหนึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ (Clay-water/cement ratio,  $w/C$ ) เท่านั้น

วรรัช เกษกัน (2548) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำ พบพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณซีเมนต์มีลักษณะที่คล้ายกับเส้นกราฟของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูงที่ศึกษาโดย Horpibulsuk et al. (2003) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10





รูปที่ 2.9 ขอบเขตปฏิสัมพันธ์ของดินเหนียวผสมซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003)



รูปที่ 2.10 กราฟกำลังอัดแกนเดียวสัมพันธ์กับปริมาณซีเมนต์ (วรรัชย์ เกษกัน, 2548)

ทรงพล บุญมาดี (2529) ได้ศึกษากำลั่งอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัดด้วยพลังงานแบบมาตรฐาน และแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่ปริมาณซีเมนต์ 1 3 5 และ 7 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 2.7 ซึ่งสรุปได้ว่า กำลั่งอัดของดินจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์และอายุบ่ม โดยกำลั่งอัดจะมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอายุบ่ม 7 วันแรก หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มของกำลั่งอัดจะลดลง

ตารางที่ 2.7 กำลั่งอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่อายุบ่ม 1 3 7 14 และ 28 วัน

(ทรงพล บุญมาดี, 2529)

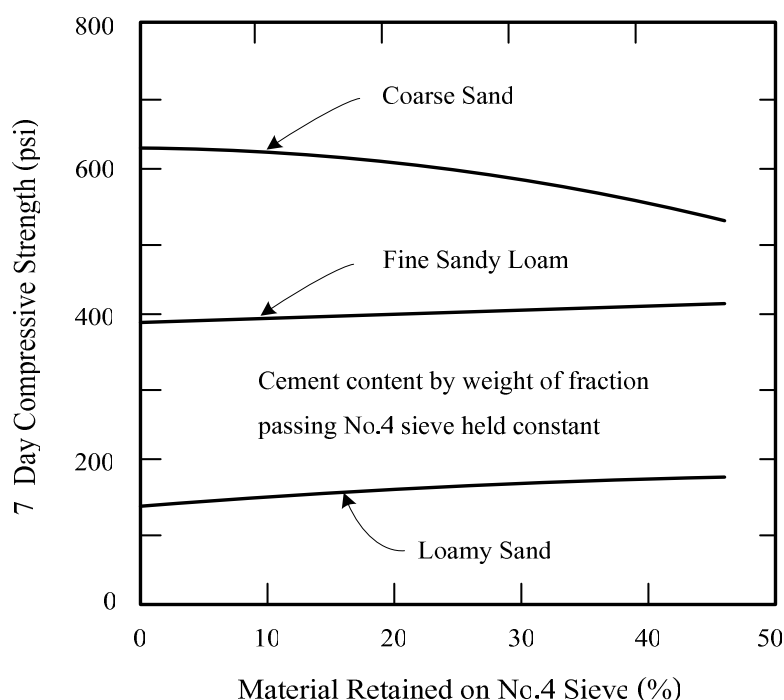
พลังงาน บดอัด	ปริมาณซีเมนต์ (%)	กำลั่งอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่อายุบ่ม 1 3 7 14 และ 28 วัน เทียบกับกำลั่งอัดของดินที่ไม่ผสมซีเมนต์ (%)				
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
มาตรฐาน	1	66	68	66	67	77
	3	240	333	544	603	725
	5	603	711	799	944	1252
	7	653	755	836	1100	1252
สูงกว่า มาตรฐาน	1	5	5	15	15	15
	3	7	100	112	145	220
	5	182	259	302	330	365
	7	254	348	382	445	557

**2.5.2 คุณสมบัติของดิน** แร่ธาตุที่ประกอบอยู่ในมวลดินตามธรรมชาติ หรือชนิดของดินมีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมดินเข้ากับซีเมนต์และน้ำ และมีผลต่อกำลั่งอัดและความคงทนของดินซีเมนต์ ส่วนประกอบเหล่านี้ได้แก่ ดินจำพวกทราย ดินตะกอน ดินเหนียว และสารประกอบอินทรีย์ เป็นต้น

Winterkorn and Chandrasekhar (1951) ได้รายงานผลการทดสอบกำลั่งอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ว่าจะได้ผลดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณมวลเม็ดหยาบและปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน

Norling and Peckard (1958) ได้ศึกษาอิทธิพลของมวลหยาบโดยใช้เปอร์เซนต์ที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ต่อกำลั่งอัดของดินซีเมนต์ 3 ชนิด คือ ทรายหยาบ (Coarse Sand) ทรายละเอียดปนอินทรีย์สาร (Fine Sand Loam) และทรายปนอินทรีย์สาร (Loamy Sand) โดยผสมด้วยปริมาณ

ซีเมนต์ที่เท่ากัน แต่เพิ่มปริมาณมวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 แตกต่างกันไป ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.11 และพบว่า Loamy Sand และ Fine Sand Loam จะมีกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณมวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีของ Coarse Sand จะมีกำลังอัดลดลง แต่การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัด กล่าวคือ เป็นการศึกษากำลังอัดที่อัตราส่วนผสมของปริมาณน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์ค่าเดียวกันเท่านั้น ซึ่งค่ากำลังอัดของดินทั้ง 3 ชนิด อาจแตกต่างจากนี้ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์

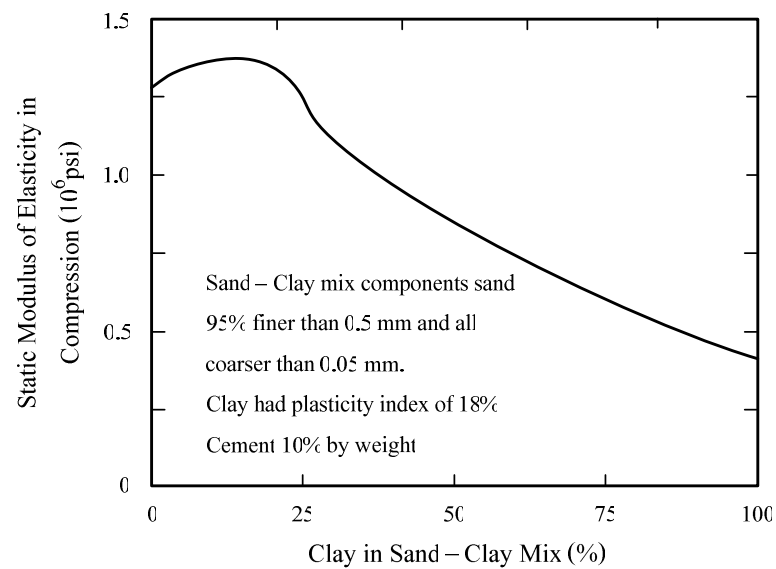


รูปที่ 2.11 อิทธิพลของวัสดุที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์  
(Norling and Peckard, 1958)

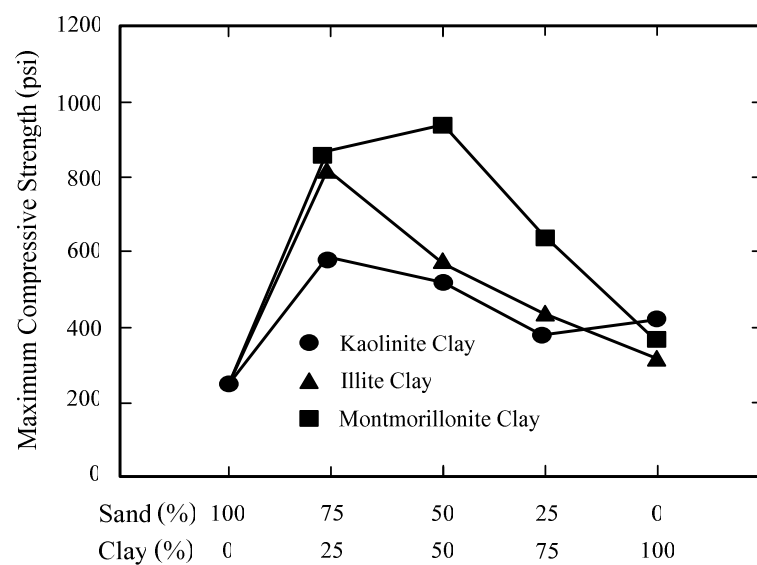
**2.5.3 ปริมาณดินเหนียวและชนิดของแร่ดินเหนียว** Reinhold (1955) ได้นำเอาทรายมาผสมกับดินเหนียวและซีเมนต์ โดยเปลี่ยนปริมาณดินเหนียว ผลแสดงในรูปที่ 2.12 พบว่า เมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะลดลง ซึ่งหมายความว่าค่ากำลังอัดก็จะลดลง

Davidson et al. (1962) ได้ศึกษากำลังอัดของดินเหนียว 3 ชนิด คือ Kaolinite Illite และ Montmorillonite ผสมกับทรายและซีเมนต์ โดยเพิ่มอัตราส่วนผสมของดินเหนียวที่ละ 25 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ ใช้อัตราส่วนทรายต่อดินเหนียวดังนี้ 100 : 0 75 : 25 50 : 50 25 : 75 และ 0 : 100 ผลแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14 พบว่า เมื่อปริมาณดินเหนียวมากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์

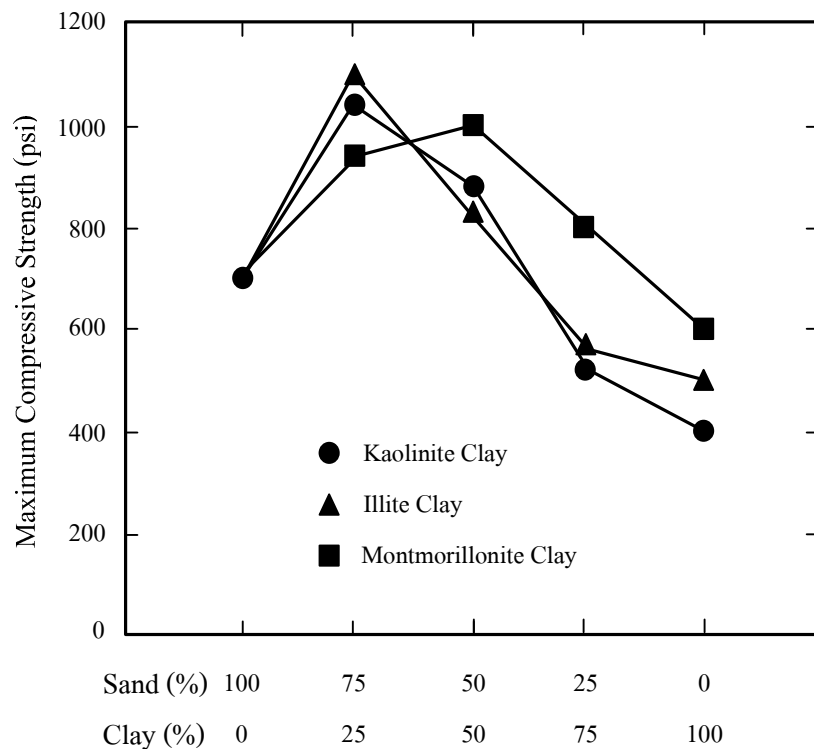
สำหรับดินพวก Cohesionless Soil จะทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์ลดลงอย่างชัดเจน และดินเหนียวจำพวก Montmorillonite ยังให้ค่ากำลังอัดที่มีแนวโน้มสูงกว่าดินเหนียวจำพวก Kaolinite และ Illite



รูปที่ 2.12 อิทธิพลของปริมาณดินเหนียวต่อค่า Modulus of Elasticity ของดินซีเมนต์ (Reinhold, 1955)



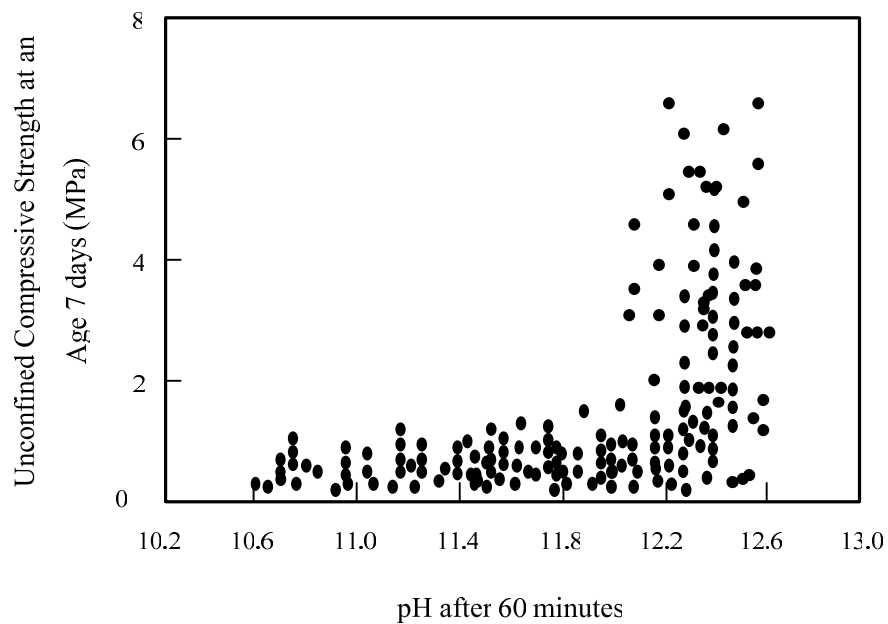
รูปที่ 2.13 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณปูนซีเมนต์ 8 เปอร์เซ็นต์ (Davidson et al., 1962)



รูปที่ 2.14 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 12 เปอร์เซ็นต์  
(Davidson et al., 1962)

**2.5.4 คุณสมบัติทางเคมีของดิน** Davidson (1961) ได้รายงานไว้ว่า ส่วนประกอบทางเคมีของดินจะทำให้ดินทำปฏิกิริยากับซีเมนต์แตกต่างกัน และจะขึ้นอยู่กับประจุลบ (Cation) ที่มีอยู่ในอนุภาคของดิน โดยเฉพาะดินที่มีสารอินทรีย์ผสมอยู่จะทำให้ปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป เช่น เกิดการแข็งตัวช้า ส่วนดินที่มีสารซัลเฟตผสมอยู่จะเกิดการบวมตัวและทำให้ค่ากำลังอัดลดลง

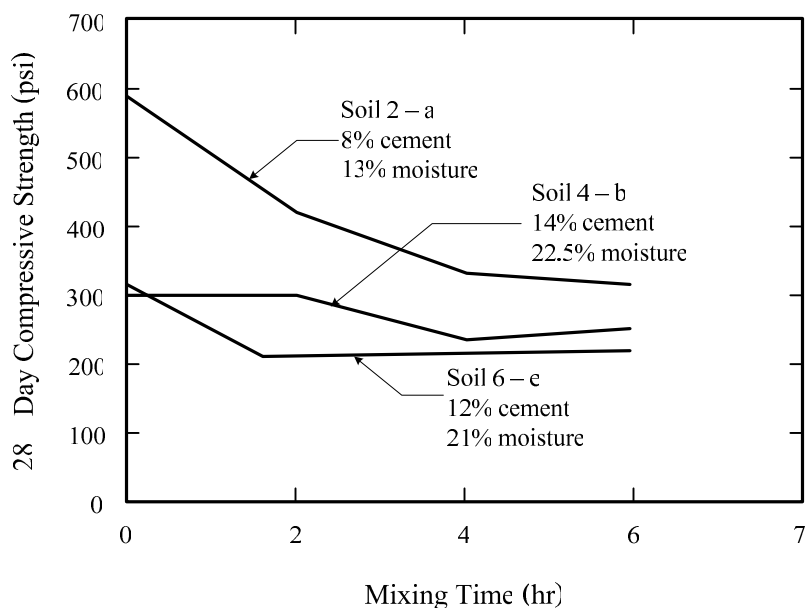
Sherwood (1958) ได้ศึกษาอิทธิพลของสารอินทรีย์ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับค่า pH ของดินซีเมนต์ที่ได้จากการผสมดินและซีเมนต์ในอัตราส่วน 1 : 10 ดังแสดงในรูปที่ 2.15 พบว่า ถ้าค่า pH ต่ำกว่า 12.1 แสดงว่าดินที่นำมาใช้ผสมมีสารอินทรีย์ผสมอยู่จึงทำให้ดินซีเมนต์แข็งตัวช้า และเป็นผลทำให้กำลังอัดลดลงเมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ที่เท่ากัน



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่า pH ของดินผสมซีเมนต์ในอัตราส่วน 1 : 10  
(Sherwood, 1958)

### 2.5.5 การผสม

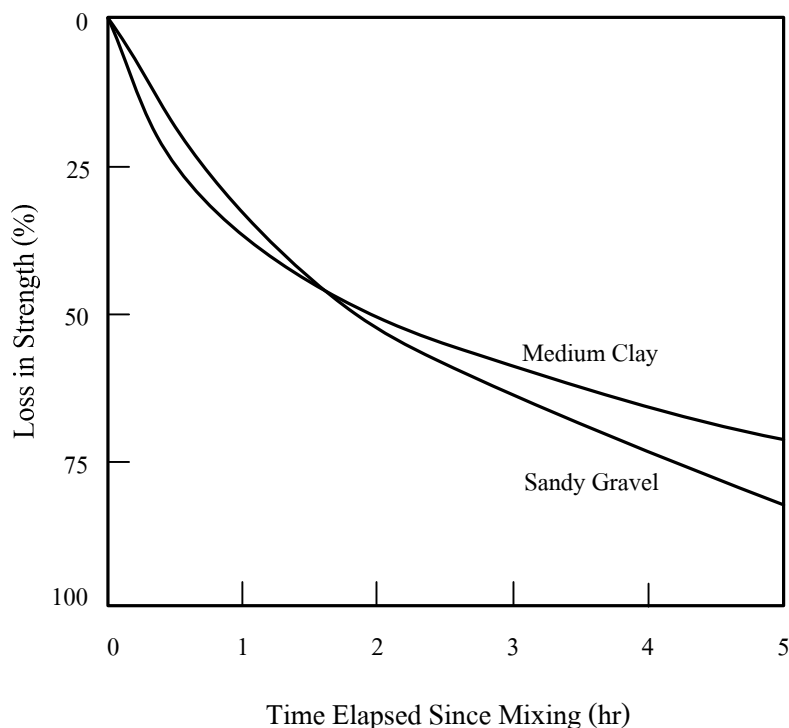
1) ระยะเวลาในการผสม Felt (1955) ได้ศึกษาอิทธิพลของการหน่วงเวลาในการผสมดินกับค่ากำลังอัดของดิน 3 ชนิด คือ ดินกลุ่ม A-2 Sandy Loam ( $LL = 26$   $PI = 11$ ) ดินกลุ่ม A-4 Silty Clay Loam ( $LL = 35$   $PI = 12$ ) และ ดินกลุ่ม A-6-7 Clay ( $LL = 47$   $PI = 26$ ) ความสัมพันธ์ของผลการทดสอบระหว่างการหน่วงเวลาผสมกับกำลังอัด แสดงในรูปที่ 2.16 พบว่า ดินทั้งสามชนิดมีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อการหน่วงเวลาในการผสมแบบทิ้งไว้นานขึ้น และการหน่วงเวลาในการผสมแบบหยุดเป็นครั้งคราวที่ใช้เวลานานขึ้นมีผลเสียน้อยกว่าการหยุดผสมเลย



รูปที่ 2.16 ผลของระยะเวลาที่ใช้ผสมต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Felt, 1955)

Ingles and Metcalf (1972) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่ใช้ผสมดินซีเมนต์ โดยใช้ดิน 2 ชนิด คือ ดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay) และทรายปนกรวด (Sandy Gravel) ผลแสดงในรูปที่ 2.17 พบว่า ถ้าระยะเวลาในการผสมที่นาน 1 ถึง 2 ชั่วโมง กำลังอัดของดินเหนียวแข็งปานกลาง และทรายปนกรวด จะลดลงมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าใช้เวลาในการผสมนานกว่า 2 ชั่วโมง ขึ้นไป เปอร์เซ็นต์การลดลงของกำลังอัดในดินทรายปนกรวดจะมากกว่าดินเหนียวแข็งปานกลางเล็กน้อย

2) ปริมาณน้ำในมวลดิน Felt (1955); Davidson et al. (1962) ทำการทดลองได้ผลตรงกันว่าปริมาณน้ำและความหนาแน่นมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ สำหรับดินทรายควรบดอัดให้อยู่ทางด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสมเล็กน้อยจะทำให้ได้กำลังอัดสูงสุด ส่วนดินเหนียวต้องบดอัดให้อยู่ทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสมเล็กน้อยจะทำให้ได้กำลังอัดสูงสุด

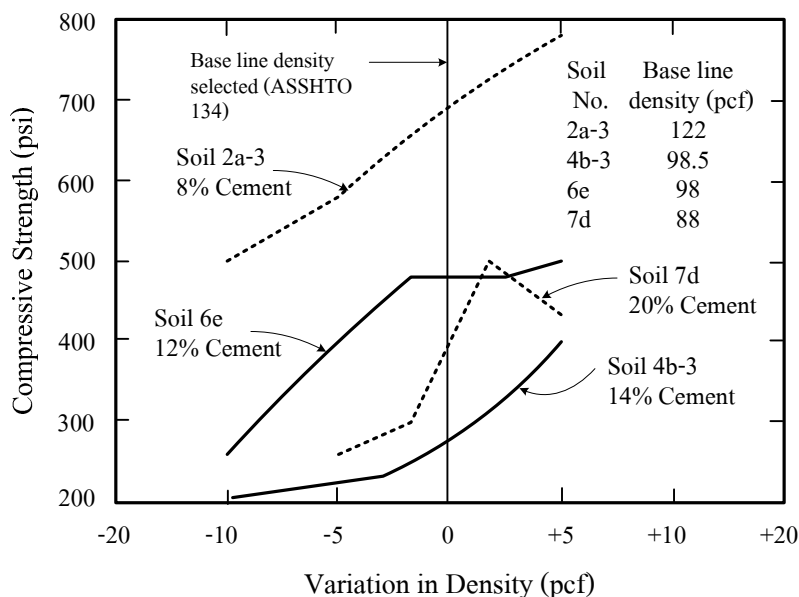


รูปที่ 2.17 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้ระยะเวลาการบดอัดนานขึ้น  
(Ingles and Metcalf, 1972)

Davidson (1961) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเหมาะสมกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ กับดิน 6 ชนิด ได้แก่ ดินกลุ่ม A-2 (Sandy Loams) A-3 (Sands) A-4 (Silts and Loams) A-5 (Silts) A-6 (Medium Clays) และ A-7 (Heavy Clays) พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการผสมให้นานขึ้นหรือทำการบดอัดซ้ำจะมีผลทำให้ค่าปริมาณน้ำเหมาะสมเพิ่มขึ้นขณะเดียวกันความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลงและทำให้กำลังอัดลดลงด้วย

3) ความหนาแน่น Felt (1955) ได้นำดิน 4 ชนิด คือ ดินกลุ่ม A-2 Sandy Loam ( $LL = 26$   $PI = 11$ ) A-4 Silty Clay Loam ( $LL = 35$   $PI = 12$ ) A-6-7 Clay ( $LL = 47$   $PI = 26$ ) และ A-7 ( $LL = 118$   $PI = 83$ ) มาทดสอบ เพื่อประเมินผลกำลังอัดจากความหนาแน่น โดยใช้การบดอัดแบบมาตรฐานตามมาตรฐาน ASSHTO กำหนดเป็นเส้นความหนาแน่นพื้นฐาน ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.18 พบว่าทุกตัวอย่างการผสมเมื่อความหนาแน่นของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้น กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นด้วย





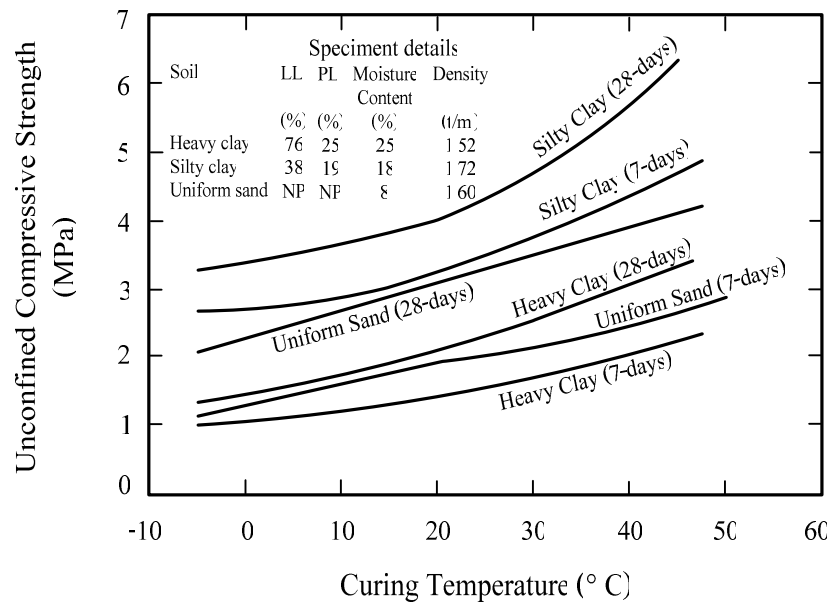
รูปที่ 2.18 อิทธิพลของความหนาแน่นต่อกำลังอัดของดินที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (Felt, 1955)

**2.5.6 การบ่ม** Clare and Pollard (1954) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ พบว่า งานก่อสร้างดินซีเมนต์ในระหว่างอากาศอบอุ่น จะให้กำลังอัดสูงกว่างานก่อสร้างที่มีลักษณะคล้ายกันในช่วงอากาศหนาวเย็นกว่า 50 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดที่อายุบ่ม 3 เดือนแรก ภายหลังการก่อสร้าง

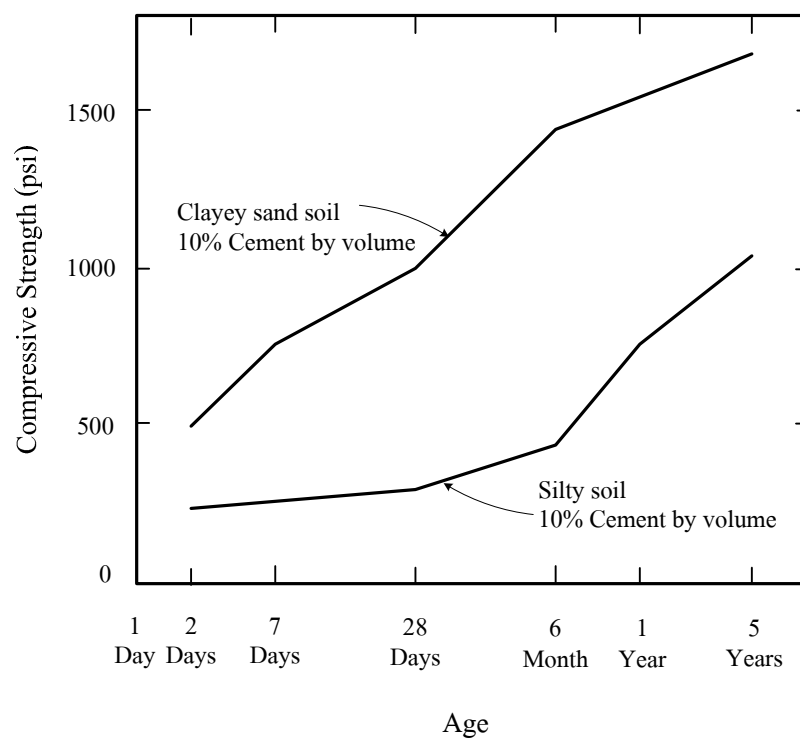
Ng (1966) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อดินลูกรัง 3 ชนิด ผสมซีเมนต์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิของการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 21 เป็น 38 องศาเซลเซียส กำลังอัดจะเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Clare and Pollard (1954) ที่พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์แปรผันตามอุณหภูมิที่ใช้บ่ม โดยให้เหตุผลว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำในมวลดิน ผลแสดงดังในรูปที่ 2.19

Leadabrand (1956) ได้ศึกษากำลังอัดของดิน 2 ชนิด คือ ดินเหนียวปนทราย (Clayey Sand) และดินตะกอน (Silt) ผสมกับซีเมนต์ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักดินแห้ง ที่อายุบ่มตั้งแต่ 2 วัน ถึง 5 ปี พบว่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุบ่มคล้ายกับคอนกรีต ผลแสดงดังรูปที่ 2.20

Maner (1952) ทำการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุในการบ่มดิน โดยนำวัสดุต่าง ๆ ได้แก่ Waterproof Paper RC-2 Asphalt Tar และ Asphalt Emulsion มาบ่มดินซีเมนต์ที่ใช้เป็นชั้นรองพื้นทางพบว่า วัสดุที่มีส่วนผสมของดินน้ำมัน (Bituminous Materials) ทั้ง 3 ชนิด และ Waterproof Paper มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้บ่มดินซีเมนต์



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิที่ใช้บ่มดินซีเมนต์ (Clare and Pollard, 1954)

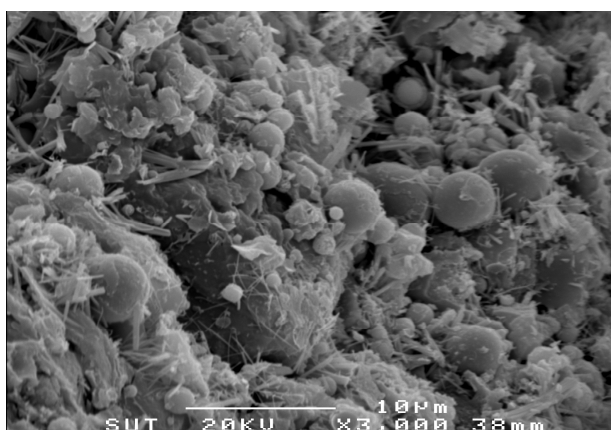


รูปที่ 2.20 อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Leadabrand, 1956)

**2.5.7 สารผสมร่วม** Ruenkrairergsa (1982) ได้รายงานว่าจำนวนปูนขาวเพียงเล็กน้อยที่เพิ่มเข้าไปผสมในดินที่มีค่าดัชนีสภาพพลาสติกสูงก่อนที่จะผสมกับซีเมนต์จะช่วยลดค่าดัชนีสภาพพลาสติกของดินเดิมลงได้มาก และทำให้ดินผสมกับซีเมนต์ได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าปูนขาวที่เพิ่มเข้าไปจะช่วยลดอิทธิพลของสารอินทรีย์ที่จะมีผลต่อปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันได้อีกด้วย

Lambe et al. (1959) ได้ทดลองนำสารประกอบจำพวกโซเดียม และแอสลอส (Fly Ash) มาผสมร่วมกับดินและซีเมนต์ พบว่า การใช้สารประกอบจำพวกโซเดียมจะช่วยให้นิคมซีเมนต์มีกำลังอัดและความคงทนเพิ่มขึ้น ส่วนแอสลอสเป็นสารผสมเพิ่มที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน ซึ่งจะทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ แอสลอสยังช่วยลดปริมาณซีเมนต์ทำให้การก่อสร้างงานดินซีเมนต์มีราคาถูก

ยุทธนา รักษาชนม์ (2551) ได้ศึกษาอิทธิพลของแอสลอสต่อกำลังอัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์ พบว่าแอสลอสในดินซีเมนต์แทบจะไม่ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก แต่จะทำให้หน้าที่เป็นวัสดุกระจายตัว ทำให้อนุภาคเม็ดดินซีเมนต์ที่มีขนาดใหญ่มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีขึ้น เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มมากขึ้น กำลังอัดของดินซีเมนต์แอสลอสขึ้นอยู่กับอิทธิพลร่วมระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการกระจายตัว ซึ่งอิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะถูกควบคุมด้วยปูนซีเมนต์ ขณะที่อิทธิพลของการกระจายตัวถูกควบคุมด้วยปริมาณแอสลอส รูปที่ 2.21 แสดงภาพถ่ายขยายของดินซีเมนต์แอสลอสที่อายุบ่ม 60 วัน พบว่าแม้ว่าผิวของแอสลอสถูกเคลือบด้วยชั้นของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน แต่ผิวของแอสลอสที่อายุบ่มนี้ ยังคงเรียบไม่ถูกกัดกร่อน ซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาทางด้านคอนกรีตเทคโนโลยี



รูปที่ 2.21 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์แอสลอสละเอียดอายุบ่ม 60 วัน  
อัตราส่วนแทนที่ 30 เปอร์เซนต์ (ยุทธนา รักษาชนม์, 2551)

## 2.6 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างดิน แสดงในตารางที่ 2.6 เสนอโดย Kamon (1979) ซึ่งใช้ทำการศึกษาด้านรูปร่างของอนุภาคดิน การจัดเรียงของโครงสร้าง และขนาดของโพรง ช่องว่าง โดยมีหลักการ และข้อจำกัด ในการศึกษาที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.8 เครื่องมือที่ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างดิน (Kamon, 1979)

	Electro microscope		X-ray diffraction	Polarization microscope	Porosimeter	อื่น ๆ
	Scanning type	Transmission type				
หลักการ	จากการสังเกตโดยใช้ Electronic line		ใช้การหักเหของรังสี X-ray	ใช้การสั่นเนื่องจากการแผ่รังสี	ใช้การแทนที่ของปรอท	คลื่นเสียง การนำไฟฟ้า การนำความร้อน คุณสมบัติของแม่เหล็ก
พิจารณา รูปร่างของอนุภาคดิน	สามารถทำได้	ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 5 ไมครอน	ไม่สามารถทำได้	พิจารณาขนาดตะกอนของอนุภาคเบื้องต้น	ไม่สามารถทำได้	ไม่สามารถทำได้
การสังเกตอนุภาคดิน	สามารถทำได้	ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 5 ไมครอน	ไม่สามารถทำได้	พิจารณาขนาดตะกอนของอนุภาคเบื้องต้น	ไม่สามารถทำได้	ไม่สามารถทำได้
พิจารณาการจัดเรียงของโครงสร้างดิน	สามารถทำได้	สามารถทำได้	สามารถทำได้	สามารถทำได้	ไม่สามารถทำได้	สามารถทำได้
พิจารณาโพรงช่องว่าง	โพรงภายในและภายนอกอนุภาคดิน	โพรงภายในและภายนอกอนุภาคดิน	ไม่สามารถทำได้	โพรงภายนอกอนุภาคดิน	พิจารณาการกระจายตัวของขนาดโพรง	สามารถทำได้บางส่วน

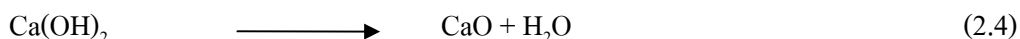
### 2.6.1 การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เกิดจากการคิดค้นเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุของกล้องจุลทรรศน์ให้สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้มากขึ้นกว่าเดิม โดยการประยุกต์นำเอาอิเล็กตรอนที่มีช่วงคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงมาใช้แทนคลื่นแสงและใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาแทนเลนส์กระจก และมีตัวตรวจวัดที่จะมาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำแสงอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง จากนั้นก็จะมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณภาพปรากฏบนจอรับต่อไป ผลที่ได้คือ ภาพของวัตถุหรือตัวอย่างมีกำลังขยายมากกว่า

3000 เท่า ถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า (กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาสามารถทำกำลังขยายได้เต็มที่ไม่เกิน 3000 เท่า) และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้ โดยขึ้นอยู่กับรายละเอียดของตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร (nanometer) ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงส่องสว่างธรรมดามีกำลังแยกแยะใช้ดูวัตถุเล็กสุดเพียง 0.2 ไมครอน เท่านั้น ในกรณีที่เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุประกอบอยู่ด้วยเรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนวิเคราะห์ (analytical electron microscope) โดยในการวิเคราะห์ธาตุจะเป็นการวิเคราะห์เฉพาะจุด (spot analysis) หรือพื้นที่เล็ก ๆ ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นหัววัด เรียกว่า อิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิส (electron probe microanalysis, EPMA) โดยใช้การวิเคราะห์ธาตุด้วยการวัดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray) ซึ่งมีทั้งแบบ Wavelength Dispersive X-ray Spectrophotometry (WDS) และแบบ Energy Dispersive X-ray Spectrophotometry (EDS) ในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) สัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron detector, SE) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้น หรือใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter Electron detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่เกิดขึ้น ดังนั้น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบนี้จะสามารถประกอบอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ได้ทั้งแบบ EDS และ WDS เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุโดยอาศัยหลักการแยกรังสีตามลำดับพลังงาน

### 2.6.2 การวิเคราะห์ Thermal Gravimetry Analysis (TGA)

เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ และวิศว จักรไพศาล (2542) ได้นำเสนอหลักการหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์ โดยใช้วิธี Thermal Gravimetry Analysis พิจารณาการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาในอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปที่อุณหภูมิระหว่าง 100 ถึง 400 องศาเซลเซียสปริมาณน้ำที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์ซึ่งประกอบด้วย ให้น้ำ น้ำในช่องว่าง น้ำดูดซึม และ น้ำระหว่างชั้นจะระเหยออกไป แต่เมื่อเผาซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น สารประกอบในซีเมนต์เพสต์จะสลายตัวเป็นสารประกอบอื่น ที่มีมวลโมเลกุลต่ำลงหรือเป็นธาตุ กล่าวคือ เมื่อซีเมนต์ เพสต์ถูกเผาที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะสลายตัว (Decomposition) เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ (2.4)



การวิเคราะห์โดยวิธี TGA จะเป็นการวัดปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัว โดยที่น้ำในส่วนนี้ระเหยออกไปคงเหลือแต่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการระเหยของน้ำในส่วนที่เป็น น้ำหนักที่สูญเสียไป (weight loss) ซึ่งสามารถวัดได้โดยตรงจากการวิเคราะห์ด้วย TGA

### 2.6.3 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก

เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ และวิศว จักรไพศาล (2542) ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมและปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  จะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสม จากการศึกษาพบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสม คือลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ทุก ๆ 10 ของเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยที่ใส่แทนที่ซีเมนต์ การหาปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยที่วัดโดยวิธี TGA เป็นปริมาณที่รวมผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และส่วนที่ลดลงจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกเรียกว่า “ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่วัดได้” การที่จะแยกแยะปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันออกจากปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ของปฏิกิริยาปอซโซลานิก อาจทำได้จากการทดสอบเปรียบเทียบซีเมนต์เพสต์ธรรมดากับซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ซึ่งเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้ปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ลดลง เรียกว่า “ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป” สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.5)

$$P = H \times (1 - R / 100) - F \quad (2.5)$$

เมื่อ  $P$  คือ เปอร์เซ็นต์ Calcium Hydroxide ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

$R$  คือ เปอร์เซ็นต์ของซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยน้ำหนัก

$H$  คือ เปอร์เซ็นต์ Calcium Hydroxide จากซีเมนต์เพสต์

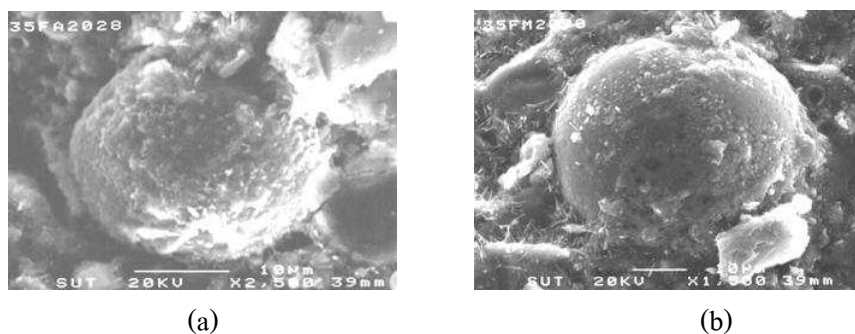
$F$  คือ เปอร์เซ็นต์ Calcium Hydroxide จากเพสต์ของเถ้าลอย

## 2.7 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

Delage and Lefebver (1984) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างของ Champlian clay โดยใช้เครื่อง Mercury Intrusion Porosimeter และ Scanning Electron Microscope ทำให้ทราบถึงขบวนการของการบดอัดดิน ได้ทำการแบ่งระดับการอัดปรอทออกเป็น 2 ระดับคือ ในครั้งแรกทำการอัดปรอทโดยให้ปรอทกระจายไปทั่วโพรง จึงทำการลดแรงดันทำให้ปรอทยังคงค้างอยู่ในตัวอย่าง หลังจากนั้นทำการอัดปรอทเป็นครั้งที่สอง โดยอัดให้ปรอทกระจายเต็มโพรงตัวอย่างอย่างไม่จำกัด ความแตกต่างของการอัดปรอททั้ง 2 ระดับจะทำให้มีปริมาณปรอทที่แตกต่างกัน ผลจากการศึกษาสรุปได้ว่าคุณสมบัติโครงสร้างมวลดินของดินเหนียวถูกกำหนดโดยมวลรวมที่อยู่ภายใต้ก้อนดิน (Intra-aggregate) และมวลรวมที่อยู่ระหว่างก้อนดิน (Inter-aggregate) ซึ่งมวลรวมจะถูกทำลายได้โดยการแปรสภาพทางกลศาสตร์ และอัตราของโพรงทั้งสองจะไม่ถูกทำลายแม้อยู่ในสภาวะที่ถูกรบกวนโพรงที่ไม่จำกัดจะถูกหมายถึงโพรงภายในก้อนดิน (Intra-aggregate) ในขบวนการอัดตัว

คายน้ำแรงดันประสิทธิผลจะเกิดจากโพรงขนาดใหญ่ และโพรงขนาดเล็กภายในก้อนจะไม่มีการอัดตัวและเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม สำหรับการอัดตัวคายน้ำที่เพิ่มขึ้นดัชนีการอัดตัวสัมพันธ์กับโพรงขนาดใหญ่

Chindaprasirt et al. (2005) ได้ศึกษาผลกระทบของความละเอียดของเถ้านหินต่อปฏิกิริยาปอซโซลานเพสต์ ที่อายุบ่ม 7 28 และ 90 วัน อัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์เท่ากับ 80 : 20 และ 60 : 40 ด้วยเครื่อง SEM พบว่าเถ้าลอยเกิดรูพรุน และช่องว่างจำนวนมาก และสามารถเห็นผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเกาะอยู่บริเวณผิวของเถ้าลอย รูพรุนเกิดจากการถูกกัดกร่อนเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก และพบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นหลังจากมีอายุบ่มมากกว่า 7 วัน ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 อนุภาคเถ้าลอยหายาบ (a) อายุบ่ม 28 วัน (b) อายุบ่ม 90 วัน

(Chindaprasirt et al., 2005)

สุขสันต์ หอพิบูลสุข รุ่งลาวัลย์ ราชน ศิวฤทธิ์ หิรัญเรือง และธีรวัฒน์ สีนศิริ (2549) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยด้วยเครื่อง Mercury Intrusion Porosimeter พบว่าการผสมวัสดุเชื่อมประสานช่วยปรับปรุงโครงสร้างดินโดยเพิ่มพันธะเชื่อมประสาน และทำให้แฟบrikแน่นขึ้น ช่องว่างภายในดินซีเมนต์เถ้าลอยประกอบด้วยช่องว่างอากาศ (ขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน) ช่องว่างระหว่างก้อนดินซีเมนต์เถ้าลอย (ขนาดระหว่าง 10 ถึง 0.01 ไมครอน) และช่องว่างภายในก้อนดินซีเมนต์เถ้าลอย (ขนาดเล็กกว่า 0.01 ไมครอน)

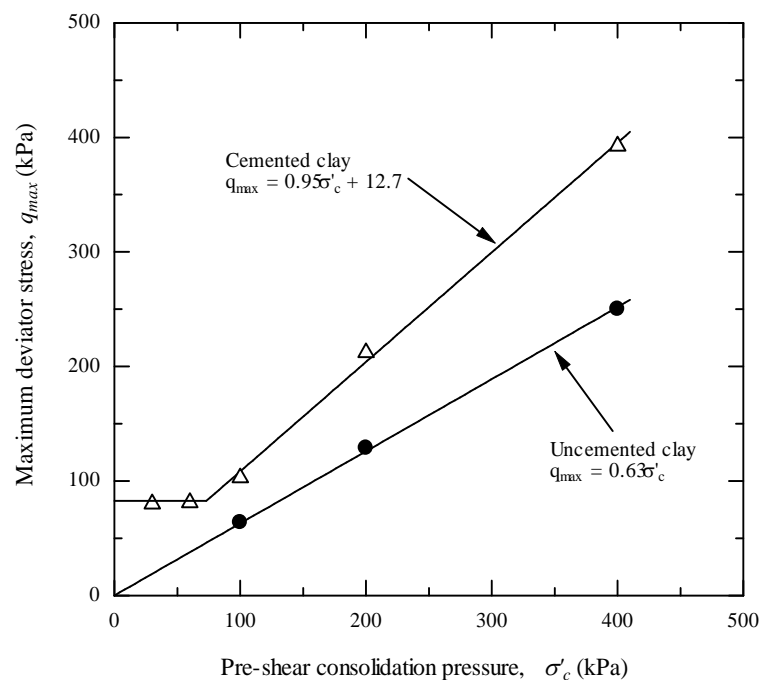
## 2.8 บทบาทของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

Horpibulsuk et al. (2004) กล่าวว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินซีเมนต์ จะขึ้นอยู่กับ การจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric) และพันธะเชื่อมประสาน เมื่อเหนือนดินประเภทนี้ภายใต้สภาวะที่

ความเค้นประสิทธิผลน้อยกว่าความเค้นครากประสิทธิผล ( $\sigma'_y$ ) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวของเม็ดดินน้อยมาก ในช่วงนี้ กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินจะขึ้นอยู่กับพันธะเชื่อมประสาน (Cementation bond) แต่เมื่อความเค้นประสิทธิผลมากกว่าความเค้นครากประสิทธิผล ทั้งการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric) และพันธะเชื่อมประสานจะมีอิทธิพลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือน (รูปที่ 2.23) และเสนอความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$q_{\max} = q_{\text{bond}} + q_{\text{fabric}} \quad (2.6)$$

โดยที่  $q_{\max}$  คือ ความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (ที่จุดวิบัติ)  
 $q_{\text{bond}}$  คือ ความเค้นเบี่ยงเบนเนื่องจากพันธะเชื่อมประสาน  
 $q_{\text{fabric}}$  คือ ความเค้นเบี่ยงเบนเนื่องจากการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric)



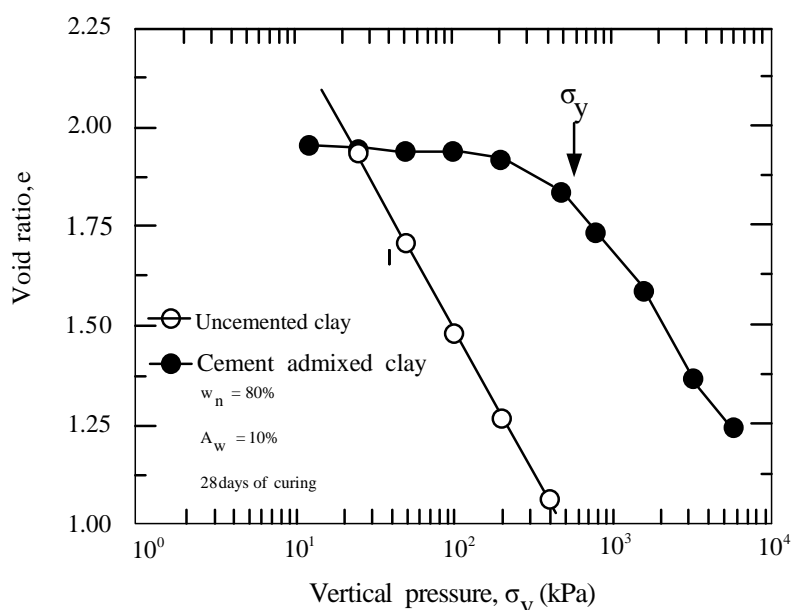
รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผล  
 (Horpibulsuk et al., 2004)

สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน (2546) แสดงผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.24 จากรูปเห็นว่า การอัดตัวคายน้ำมีค่าน้อยมากในช่วงก่อนจุดคราก (Yield stress) เป็นเพราะอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน แต่การอัดตัวมีค่าเพิ่มขึ้น

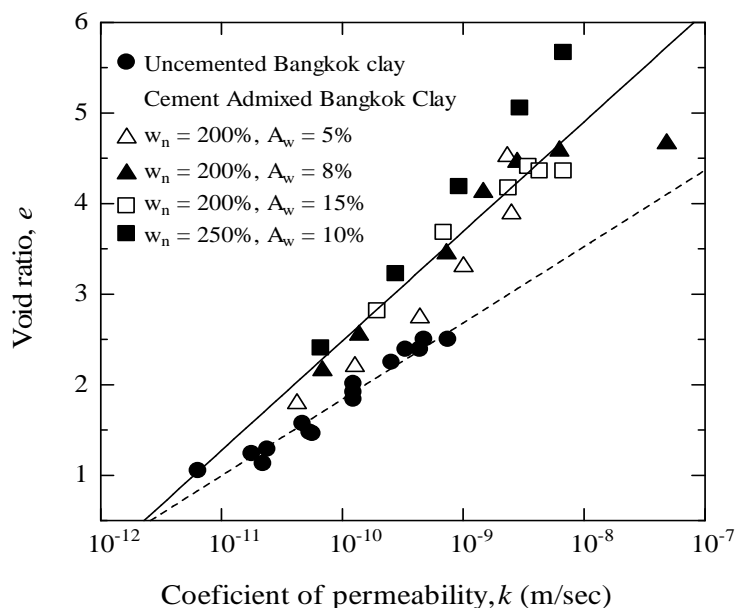


อย่างชัดเจนในช่วงหลังจุดคราก ซึ่งสภาวะหลังจุดครากนี้ ดัชนีการอัดตัว (Compression index) มีค่าค่อนข้างคงที่กับการเพิ่มขึ้นของความเค้นในแนวดิ่ง นอกจากนี้ ดินเหนียวซีเมนต์ (ดินพันธะเชื่อมประสาน) สามารถที่จะเสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วนโพรงสูง ๆ เมื่อเทียบกับดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน

สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน (2546) แสดงผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานและดินเหนียวซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.25 จะเห็นว่า พันธะเชื่อมประสานมีอิทธิพลต่อการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวอย่างมาก ที่อัตราส่วนโพรงที่เท่ากัน ดินเหนียวซีเมนต์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่า ดังนั้น พันธะเชื่อมประสานนอกจากจะเป็นการเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือน และลดการทรุดตัวแล้ว ยังเป็นการลดการซึมผ่านของน้ำ ซึ่งมีประโยชน์สำหรับงานโครงสร้างที่บดน้ำ เช่น งานซ่อมแซมเขื่อนที่แตกร้าว และ Cut-off wall เป็นต้น



รูปที่ 2.24 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ เปรียบเทียบกับดินเหนียวกรุงเทพไร้พันธะเชื่อมประสาน (สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน, 2546)



รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียว  
ไร้พันธะเชื่อมประสาน และ ดินเหนียวซีเมนต์ (สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ  
รุ่งลาวัลย์ ราชัน, 2546)

ในงานคอนกรีตการนำเถ้าลอยมาทดแทนปริมาณซีเมนต์ได้มีการศึกษาพบว่าคอนกรีตจะมีความทนน้ำเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากรูปร่างของเถ้าลอยมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีขนาดเล็กกว่าซีเมนต์ จึงเข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์ และยังช่วยทำให้คอนกรีตง่ายต่อการเท การทำปฏิกิริยาของเถ้าลอยเมื่อนำไปผสมในคอนกรีตจะมีลักษณะคล้ายกับ การทำปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ซึ่งต้องอาศัยแร่ดินเหนียวในการทำปฏิกิริยาอันดับที่สอง โดยที่ Silica และ Alumina ซึ่งเป็นธาตุหลักที่มีอยู่ในเถ้าลอยจะเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซโลนิกกับสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดสารประกอบ CSH และ CAH ที่มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสาน ซึ่งการทดแทนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในงานดินจะช่วยให้การทำปฏิกิริยาอันดับที่สองเกิดเพิ่มมากขึ้นโดยไม่ต้องอาศัย Silica และ Alumina จากแร่ดินเหนียวแต่เพียงอย่างเดียว การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินจะช่วยให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงภายในมวลดินที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยโดยเฉพาะกำลังอัด โดยที่การศึกษาโครงสร้างจุลภาคมีอยู่หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะให้คำตอบเพื่ออธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่แตกต่างกันออกไป Scanning electron microscope เป็นการอธิบายเชิงคุณภาพถึงการเปลี่ยนแปลงภายในมวลดินโดยการสังเกตจากภาพถ่าย Thermalgravimetry analysis เป็นการอธิบายเชิงปริมาณถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ Silica และ Alumina กับสารประกอบ  $(\text{Ca})\text{OH}_2$

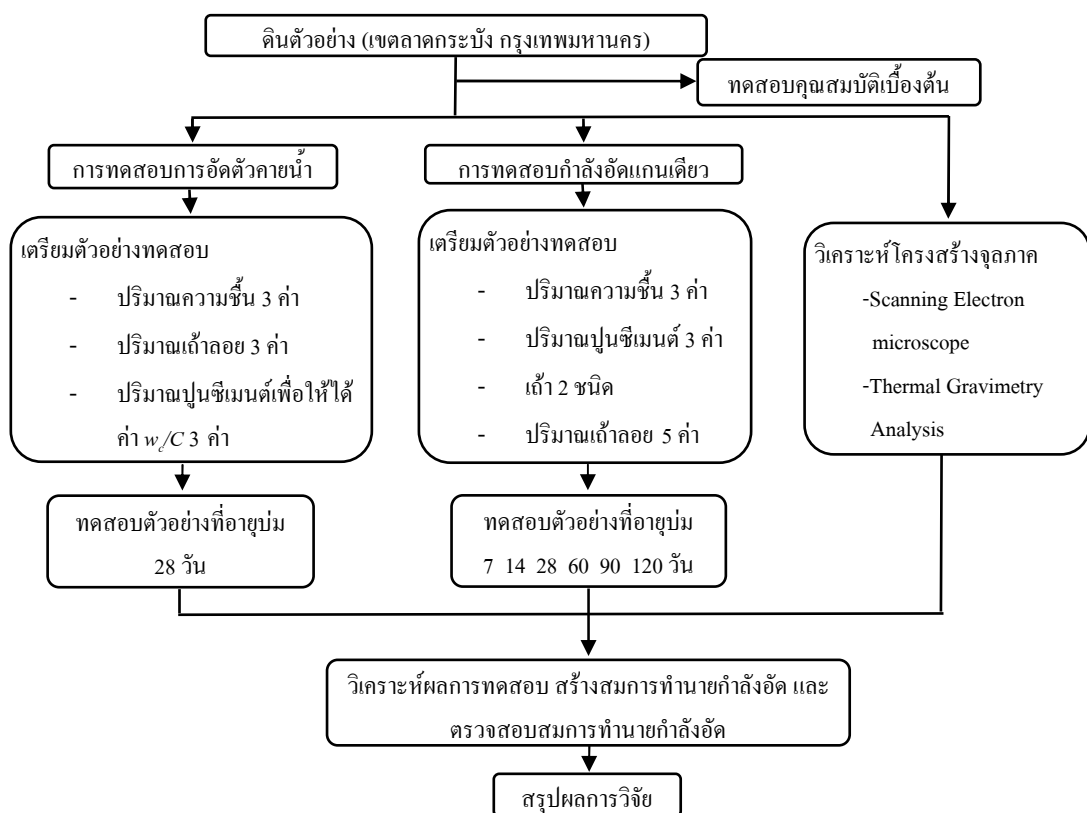
ที่ทำปฏิกิริยาปอซโซโลนิกต่อกันซึ่งได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ผสมเถ้า คือปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และอายุบ่ม ซึ่งตัวแปรดังกล่าว จะได้นำไปพิจารณากำลัังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในงานวิจัยครั้งนี้

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

##### 3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาและอธิบายกลไกควบคุมกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์เถ้าลอย โดยเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษามี 2 ชนิด ได้แก่ เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล นำเถ้าทั้งสองมาผสมกับดินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยอัตราส่วนผสมต่าง ๆ และหาค่ากำลังอัดแกนเดียวเพื่อสร้างสมการทำนายกำลัง วิธีสร้างสมการทำนายกำลังอัด อาศัยหลักการพารามิเตอร์ปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (clay water / cement ratio,  $w_c/C$ ) ร่วมกับตัวแปรปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า แผนงานวิจัยทั้งหมดสามารถแสดงแผนภูมิได้ดังรูปที่ 3.1 วิธีการทดสอบและจำนวนตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 3.1 รายละเอียดแต่ละขั้นตอนจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 3.1 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง

การทดสอบ	จำนวนตัวอย่าง
คุณสมบัติพื้นฐาน	ดินตัวอย่างแปรสภาพ จากเขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร แก้วลอยถ่านหินและแก้วชีวมวล
การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์แก้วลอยถ่านหิน (ปริมาณความชื้น 3 ค่า $\times$ ปูนซีเมนต์ 3 ค่า $\times$ ปริมาณแก้วลอย 5 ค่า $\times$ 6 อายุบ่ม (3 ก่อนตัวอย่าง))	จำนวน 810 ชุดตัวอย่าง
การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์แก้วชีวมวล (ปริมาณความชื้น 3 ค่า $\times$ ปูนซีเมนต์ 3 ค่า $\times$ ปริมาณแก้วลอย 3 ค่า $\times$ 6 อายุบ่ม (3 ก่อนตัวอย่าง))	จำนวน 486 ชุดตัวอย่าง
การทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินซีเมนต์แก้วลอยถ่านหิน (ปริมาณความชื้น 3 ค่า $\times$ แก้วลอย 3 ค่า $\times$ ปูนซีเมนต์เพื่อให้ได้ค่า $w_c / C$ 1 ค่า $\times$ 1 อายุบ่ม)	จำนวน 9 ชุดตัวอย่าง
การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์แก้วลอยถ่านหิน ที่ $w_c / C$ เท่ากัน (ปริมาณความชื้น 3 ค่า $\times$ ปริมาณแก้วลอย 3 ค่า $\times$ ปูนซีเมนต์เพื่อให้ได้ค่า $w_c / C$ 3 ค่า $\times$ 1 อายุบ่ม)	จำนวน 27 ชุดตัวอย่าง
ตรวจสอบสมการทำนายกำลังอัด (ปริมาณความชื้น 3 ค่า $\times$ ปริมาณแก้วลอย 2 ค่า $\times$ ปริมาณปูนซีเมนต์ 3 ค่า $\times$ 6 อายุบ่ม (3 ก่อนตัวอย่าง))	จำนวน 324 ชุดตัวอย่าง

ตารางที่ 3.1 แสดงตัวแปรของตัวอย่างดินซีเมนต์แก้วลอย ซึ่งตัวอย่างทดสอบเมื่อถึงอายุบ่มจะถูกนำไปทดสอบตามรายละเอียด หลังจากนั้นจะพิจารณาตัวอย่างดินซีเมนต์แก้วลอยที่สนใจนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคตามวิธี Scanning electron microscope และ Thermal gravimetry analysis ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

### 3.2 การเก็บและการเตรียมดินตัวอย่าง

**3.2.1 การเตรียมตัวอย่างดิน** ดินตัวอย่างเป็นดินเหนียว เก็บแบบแปรสภาพจากเขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ที่ความลึก 3.0 ถึง 4.0 เมตร

**3.2.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง (Basic Property)** ดินตัวอย่างจะถูกนำมาหาคุณสมบัติเบื้องต้น ในห้องปฏิบัติการดังต่อไปนี้

- 1) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) การหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินเม็ดละเอียด (ขนาดเล็กลงกว่า 475 มิลลิเมตร) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 854
- 2) การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) ทดสอบโดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบล้างตามมาตรฐานของ ASTM D 422
- 3) การวิเคราะห์ขนาดเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 422-63
- 4) การหาขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, LL) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4318
- 5) การหาขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4318
- 6) การทดสอบหาอัตราการบวมตัวอิสระ (Free swell ratio, FSR) ทดสอบตามวิธีของ Prakash and Sridharan (2004)

### 3.3 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดราข้าง ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมคิดเป็น 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง

### 3.4 etailoyถ่านหินและetailoyชีวมวล

ในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้etailoy 2 ชนิด คือ etailoyถ่านหิน และetailoyชีวมวล etailoyถ่านหินที่ใช้นำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง etailoyชีวมวลนำมาจากบริษัทไทยปาวเวอร์โอเพอร์เลต จำกัด จังหวัดฉะเชิงเทรา ในการศึกษานี้etailoyทั้งสองถูกร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ทำการวิเคราะห์การกระจายของอนุภาค (Particle Size Distribution) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer)

### 3.5 การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์เกล้าลอย

ดินตัวอย่างถูกร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อแยกเศษเปลือกหอยและเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่ออก และทำการปรับปริมาณความชื้นในดินให้มีค่า 1.0 1.5 และ 2.0 เท่าของ Liquidity index (LI) เพื่อจำลองการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นในขณะทำการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยเทคนิคการผสมเปียก (Wet method) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมเท่ากับ 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง เกล้าลอยที่ใช้มีสองชนิดคือ เกล้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล เกล้าลอยถ่านหินผสมกับปูนซีเมนต์ในปริมาณ 0 10 15 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์เถ้าชีวมวลผสมกับปูนซีเมนต์ในปริมาณ 0 10 และ 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ โดยเถ้าชีวมวลจำนวน 2 ค่า คือ 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ นำไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ดินตัวอย่างถูกนำมาผสมกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอยตามอัตราส่วนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นบรรจุตัวอย่างดินซีเมนต์เกล้าลอยในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร โดยมีดินตัวอย่าง 3 ตัวอย่างในหนึ่งส่วนผสม หลังจากนั้นอีก 24 ถึง 48 ชั่วโมง ทำการถอดตัวอย่างดินซีเมนต์เกล้าลอยออกจากแบบหล่อและห่อด้วยฟิล์มถนอมอาหาร บ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิ ( $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 7 14 28 60 90 และ 120 วัน เมื่อครบอายุบ่มนำไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทันที

### 3.6 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

เมื่อได้ดินซีเมนต์เถ้าตามอายุบ่มที่ต้องการ นำตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าล่อยไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

**3.6.1** นำตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าล่อยออกจากฟิล์มพลาสติก ทำการชั่งน้ำหนัก วัดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางให้ละเอียด 0.1 มิลลิเมตร โดยใช้ Venires caliper

**3.6.2** นำตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าล่อยเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัดแกนเดียว โดยใช้อัตราการกด 1.0 เปอร์เซ็นต์ ของความสูงของดินตัวอย่างแล้วบันทึกผลการทดสอบในรูปความเค้นและความเครียดของดิน

### 3.7 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

หลังจากทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ เพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณเถ้าล่อย ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าล่อยแล้ว ทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินซีเมนต์เถ้าล่อย โดยใช้อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์ (Clay-water/cement ratio) เท่ากับ 12 และทำการทดสอบที่อายุบ่ม 28 วัน

**3.7.1** การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าล่อย เตรียมตัวอย่างดิน ให้มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.0 1.5 และ 2.0 เท่าของ Liquidity index ผสมกับเถ้าล่อยเพื่อให้ได้ค่าอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 12 เมื่อถึงอายุบ่ม 28 วัน นำไปทดสอบการอัดตัวคายน้ำทันที

**3.7.2** การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ ทำการทดสอบโดยเครื่องมือการทดสอบการทรุดตัวของดิน (Consolidometers หรือ Oedometers) ดินซีเมนต์เถ้าล่อยถูกแต่งให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 มิลลิเมตร และสูง 25.4 มิลลิเมตร ความเค้นกดทับกระทำโดยใช้ระบบคานงัด (Level arm) การทรุดตัวแนวตั้งอ่านได้จากมาตรหน้าปัด (Dial gauge) ในการเติมน้ำหนักจะเติมน้ำหนักขึ้นเท่าตัวเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ นำตัวอย่างไปหาค่าน้ำหนักแห้งเพื่อคำนวณหาอัตราส่วนโพรง กราฟการอัดตัวคายน้ำแสดงด้วยความสัมพันธ์  $e$ - $\log \sigma_v'$  และ  $\varepsilon_v$ - $\log \sigma_v'$  เมื่อ  $e$  คือ อัตราส่วนโพรง  $\varepsilon_v$  คือ ความเครียดเชิงปริมาตร และ  $\sigma_v'$  คือ ความเค้นประสิทธิผล

### 3.8 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ความถูกต้องของสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าล่อยตรวจสอบโดยเปรียบเทียบกับผลทดสอบสองชุดได้แก่ ดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล (ข้อมูลของผู้วิจัย) จีดจำกัดเหลวและจีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 89 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จัดเป็นดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกสูง (CH) ตามระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ ปริมาณเถ้าล่อยที่ใช้เท่ากับ 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของ



น้ำหนักปูนซีเมนต์ และดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล (วีรยา จิมอ้อย และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน, 2552) จัดจำกัด เหลวและจัดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 92 และ 45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จัดเป็นดินเหนียวที่มีสภาพ พลาสติกสูง (CH) ตามระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ ปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ในส่วนผสมเท่ากับ 0 11 และ 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

### 3.9 การทดสอบโครงสร้างจุลภาค

การศึกษาด้าน โครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าลอย ดำเนินหลังจากการทดสอบกำลังอัด แกนเดียวแล้วเสร็จ เก็บตัวอย่างดินที่วิบัติส่วนกลางไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดยวิเคราะห์ผล ของโครงสร้างจุลภาคจะมีการทดสอบสองการทดสอบ ได้แก่ Thermal gravimetry analysis และการถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning electron microscope

**3.9.1 การทดสอบ Thermal gravimetry Analysis** ปริมาณของ Calcium Hydroxide ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ของดินซีเมนต์หาได้จากการทดสอบ Thermal gravimetry analysis เลือกใช้ดินซีเมนต์ที่มีค่าปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 12 ปริมาณความชื้นในดินแตกต่างกันสามค่าคือ 1.0 1.5 และ 2.0 เท่าของ Liquidity index ที่อายุบ่ม 28 วัน และทดสอบหาปริมาณของ Calcium Hydroxide ของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินที่ปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 4 และ 12 มีค่า Liquidity index เท่ากับ 1.5 ปริมาณเถ้าลอยสามค่าคือ 0 10 และ 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ ที่อายุบ่ม 28 วัน

**3.9.2 การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope, (SEM)** ถ่ายภาพดิน ซีเมนต์ด้วยเครื่อง SEM โดยใช้ดินตัวอย่างที่มีค่าปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 4 และ 12 ปริมาณความชื้นในดินแตกต่างกันสามค่าคือ Liquidity index เท่ากับ 1.0 1.5 และ 2.0 ที่อายุบ่ม 28 วัน และถ่ายภาพดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินโดยเลือกใช้ส่วนผสมที่มีค่า Liquidity index เท่ากับ 1.0 ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้งและปริมาณเถ้าลอยเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ที่อายุบ่ม 120 วัน

## บทที่ 4

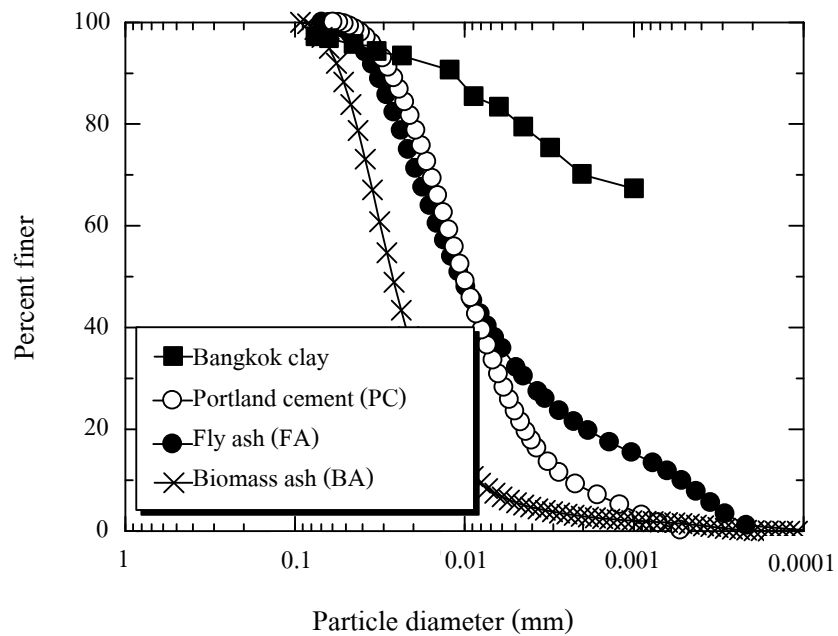
### ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

#### 4.1 บทนำ

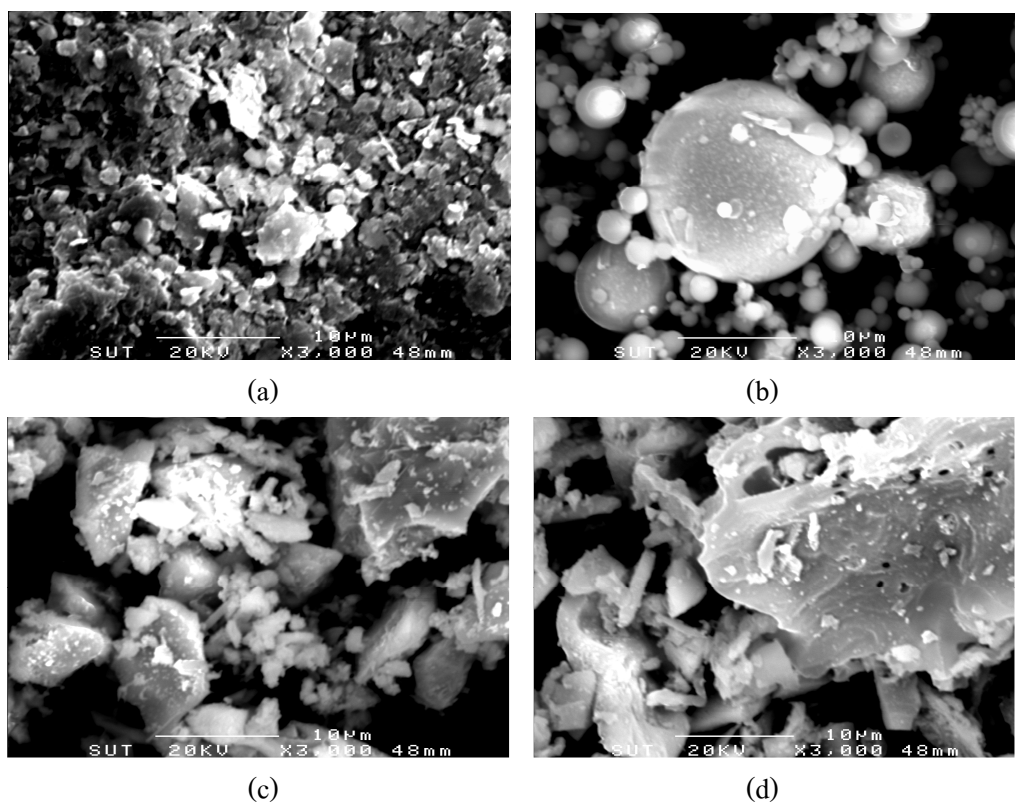
บทนี้นำเสนอผลการศึกษากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยเพื่อสร้างความเข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุมกำลังอัด (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้า และอายุบ่ม) และนำเสนอสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอย เพื่อใช้ในการประมาณกำลังอัดโดยแปรผันตัวแปรควบคุม โดยอาศัยเพียงผลทดสอบที่ 28 วัน ท้ายสุดจะอธิบายการพัฒนากำลังอัดโดยด้วยผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

#### 4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวลที่ใช้ในการศึกษา

ดินตัวอย่างทดสอบเป็นดินเหนียว เก็บจากเขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ที่ความลึก 3.0 ถึง 4.0 เมตร จีดจำกัดเหลวและจีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 89 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดินตัวอย่างประกอบด้วยทราย ดินตะกอน และดินเหนียวในปริมาณ 3 27 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ดินประเภทนี้จัดเป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูง (CH) ตามระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ มีค่าอัตราการบวมตัวอิสระเท่ากับ 1.3 จัดเป็นดินบวมตัวต่ำ (Prakash and Sridharan, 2004) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง เถ้าลอยถ่านหินได้มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และเถ้าชีวมวลได้จากบริษัทไทยพาวเวอร์โอเพอร์เลต จำกัด จังหวัดฉะเชิงเทรา ขนาดผลของดินเหนียว เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวลที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analysis แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวล

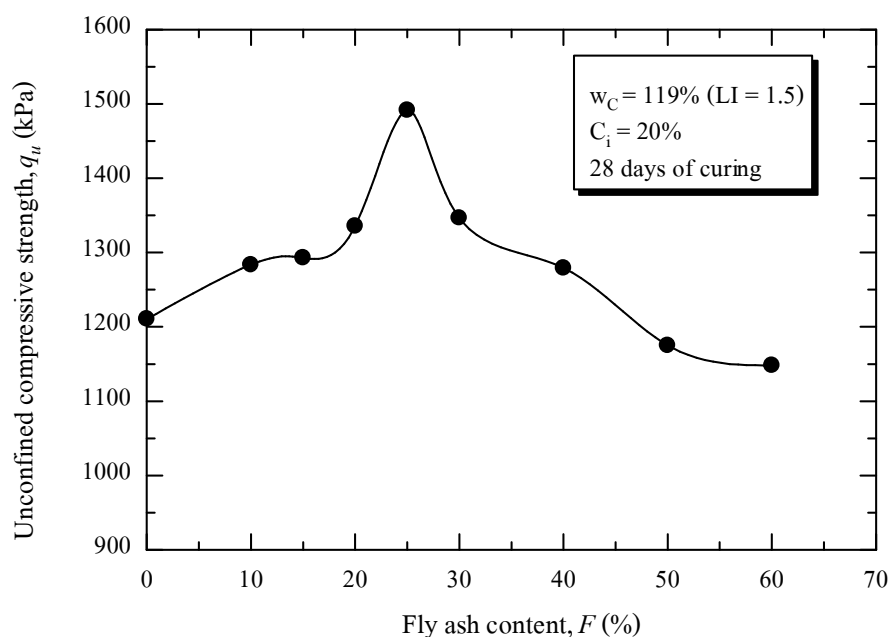


รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า (a) ดินตัวอย่าง (b) เถ้าลอยถ่านหิน (c) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (d) เถ้าชีวมวล

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายกำลังขยายของดินเหนียว เถ้าลอยถ่านหิน เถ้าชีวมวล และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นว่าดินมีลักษณะเป็นแผ่นอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน ส่วนเถ้าลอยถ่านหินมีลักษณะเป็นเม็ดกลมผิวเรียบและมีขนาดแตกต่างกัน เถ้าชีวมวลมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมคล้ายกับเถ้าชีวมวล

### 4.3 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอย

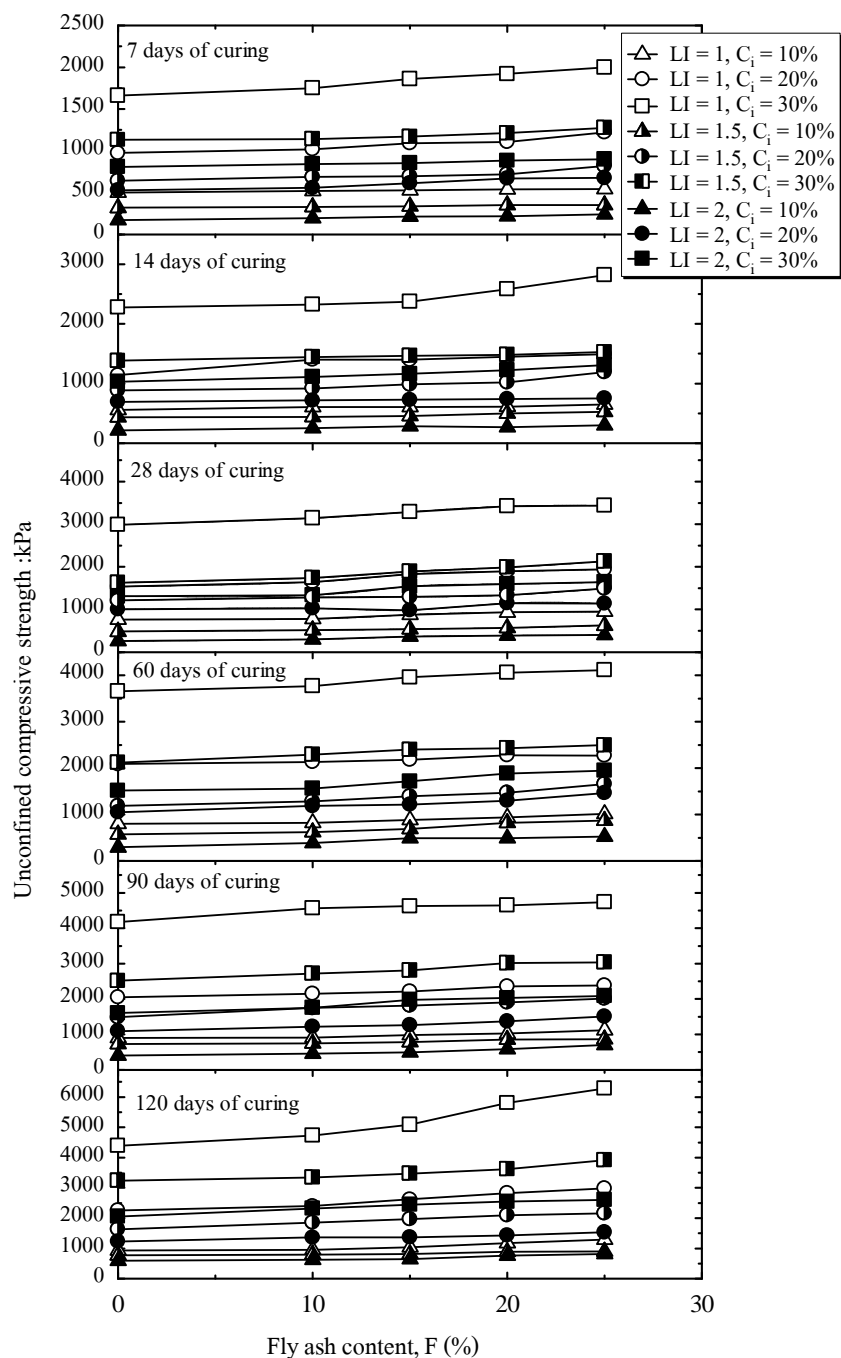
รูปที่ 4.3 แสดงผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินที่ปริมาณความชื้น 119 เปอร์เซ็นต์ ( $LI = 1.5$ ) ปริมาณปูนซีเมนต์ 20 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (ปริมาณเถ้าลอยน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์) หลังจากนั้นกำลังอัดมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และสามารถกล่าวได้ว่าปริมาณเถ้าลอยที่เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นในการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยจึงเลือกทดสอบในช่วงปริมาณเถ้าลอยไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์



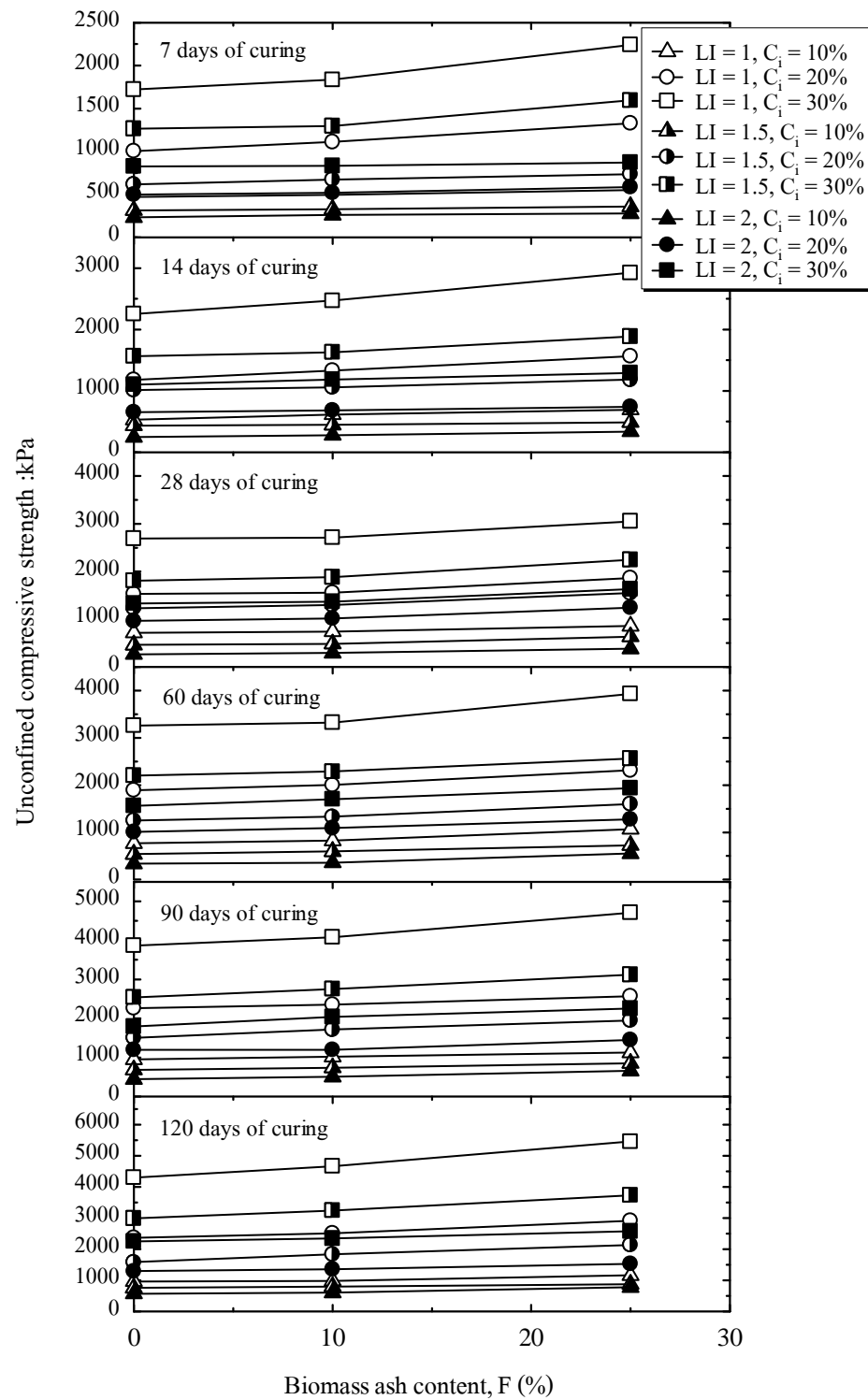
รูปที่ 4.3 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินที่อายุบ่ม 28 วัน

รูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงการพัฒนากำลังแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน และ เถ้าชีวมวล ตามลำดับ พบว่าที่ปริมาณความชื้นและปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ ในปริมาณเถ้าลอยที่ไม่เกิน

25 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุบ่ม 7 14 28 60 90 และ 120 วัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย สำหรับทุกอัตราส่วนผสม ในอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และปริมาณเถ้าลอยที่เท่ากัน ปริมาณความชื้นที่สูงกว่าจะให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าเนื่องจากระยะห่างระหว่างอนุภาคดิน (Pore space) มีมากกว่า และทุกอัตราส่วนผสมที่เท่ากันกำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณเถ้าลอยของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณเถ้าลอยของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล

จากการศึกษาของยุทธนา รักษาชนม์ (2551) และ Horpibulsuk et al. (2009) พบว่าเถ้าลอยในดินซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุกระจายอนุภาคดินซีเมนต์ทำให้ดินซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีขึ้น และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาประกอบกับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณเถ้าลอยจากรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอยในปริมาณไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ของปูนซีเมนต์ทำให้กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเปรียบเสมือนการเพิ่มปูนซีเมนต์ให้กับดินซีเมนต์จึงได้ตั้งสมการที่ 4.1

$$C_e = kf \quad (4.1)$$

เมื่อ  $C_e$  คือ ปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า  $k$  คือตัวแปรประสิทธิภาพ และ  $f$  คือปริมาณเถ้าลอยซึ่งเป็นปริมาณโดยน้ำหนักของดินแห้ง หรือเขียนสมการที่ 4.1 ได้ใหม่ในรูปของปริมาณเถ้าลอยโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ได้ตั้งสมการที่ 4.2

$$C_e = kC_i F \quad (4.2)$$

เมื่อ  $C_i$  คือปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใส่เริ่มต้น  $F$  คือปริมาณเถ้าลอยโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ดังนั้นปริมาณปูนซีเมนต์ทั้งหมด ( $C$ ) ที่มีอยู่ในดินเหนียวจึงเท่ากับ

$$\begin{aligned} C &= C_i + C_e \\ C &= C_i (1 + kF) \end{aligned} \quad (4.3)$$

โดยการรวมสมการที่ 4.2 และ 4.3 เข้ากับตัวแปรอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (Horpibulsuk and Miura, 2001; Muira et al., 2001; Horpibulsuk et al., 2003) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่อายุบ่มใด ๆ แสดงดังนี้

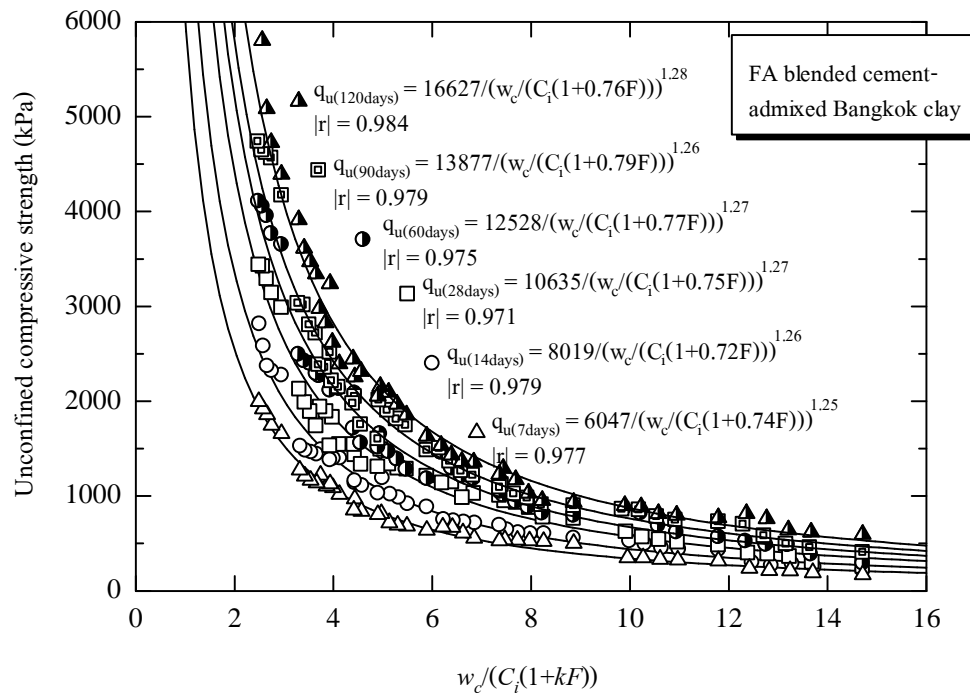
$$q_u = \frac{A}{\left( \frac{w_c}{C_i(1+kF)} \right)^B} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $A$  และ  $B$  เป็นค่าคงที่ และ  $q_u$  คือกำลังอัดที่อายุบ่มใด ๆ พารามิเตอร์  $A$   $B$  และตัวแปรประสิทธิภาพ  $k$  สามารถหาได้จากการทำ Non-linear regression ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์  $A$   $B$  และ  $k$  ของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวลที่อายุบ่ม 7 14 28 60 90 และ 120 วัน รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวลที่อายุต่าง ๆ ด้วยพารามิเตอร์อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ที่นำเสนอสามารถใช้ได้กับดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณความชื้นค่า เท่ากับ 1.0 ถึง 2.0 เท่าของ Liquidity index ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้งและปริมาณเถ้าลอยที่ 0 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ได้ ค่าของพารามิเตอร์  $A$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2003) และมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละอายุบ่มสำหรับเถ้าลอยทั้งสองชนิด จากผลที่ได้พบว่าค่าของพารามิเตอร์  $A$  และ  $B$  ของเถ้าลอยทั้งสองชนิดมีค่าประมาณเท่ากันที่อายุบ่มเดียวกัน พารามิเตอร์  $B$  มีค่าประมาณคงที่ไม่แปรผันตามอายุบ่ม เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2003) การที่ค่า  $k$  มีค่าประมาณเท่ากันสำหรับเถ้าลอยทั้งสองนี้ ทำให้สรุปได้ว่าส่วนประกอบทางเคมีและรูปร่างของเถ้าลอยทั้งสองที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัด เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกแทบไม่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์เถ้าลอย (Horpibulsuk et al., 2009)

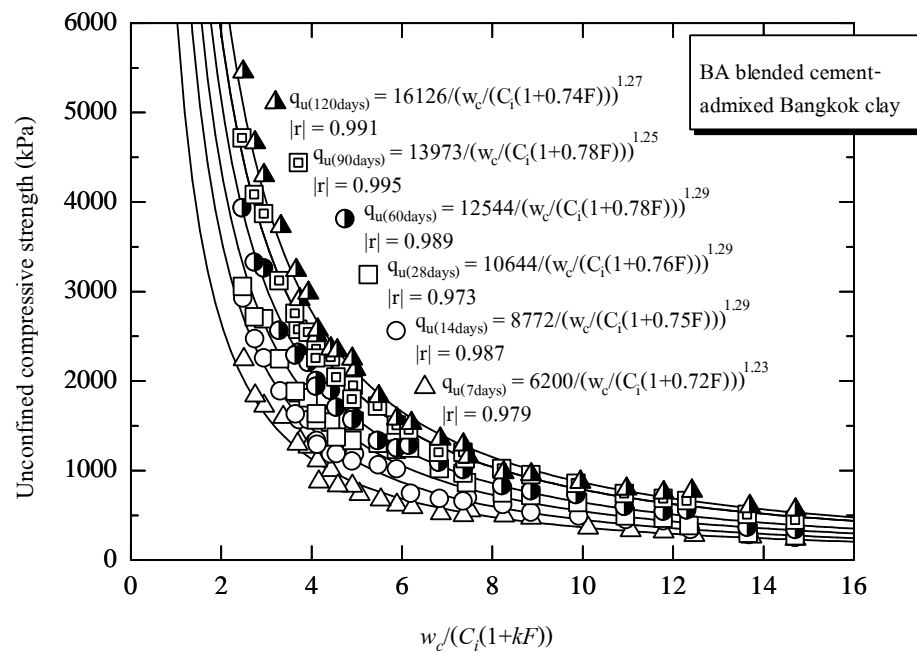
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์  $A$   $B$  และ  $k$  ของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวลที่อายุบ่มต่าง ๆ

อายุบ่ม (วัน)	เถ้าลอยถ่านหิน			เถ้าชีวมวล		
	$A$	$B$	$k$	$A$	$B$	$k$
7	6047	1.25	0.74	6200	1.23	0.72
14	8019	1.26	0.72	8772	1.29	0.75
28	10634	1.27	0.75	10644	1.29	0.76
60	12528	1.27	0.77	12544	1.29	0.78
90	13877	1.26	0.79	13973	1.25	0.78
120	16627	1.28	0.76	16126	1.27	0.74





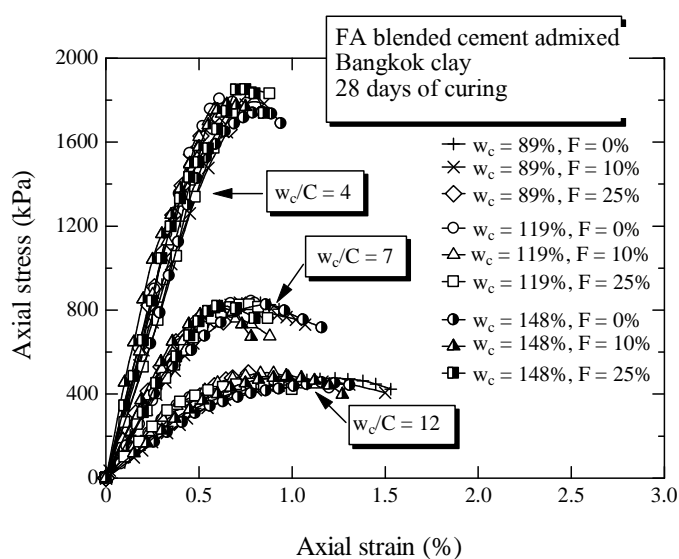
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (ถ้ำลอยถ่านหิน)



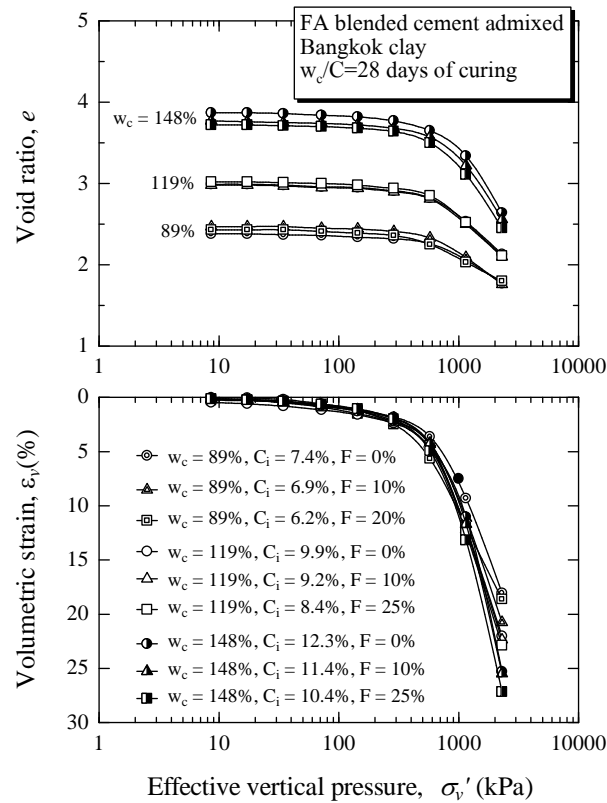
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดอัตราส่วนและปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (ถ้ำชีวมวล)

เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ต่อความสัมพัทธ์ของความเค้นและความเครียดของดินซีเมนต์เถ้าลอย ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบ Oedometer และ Unconfined compressive test ของดินตัวอย่างที่มีค่าอัตราส่วนน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากัน โดยใช้ค่า  $k$  เท่ากับ 0.75 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ซึ่งแสดงพฤติกรรมการอัดตัวของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินที่มีค่าอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากันแต่มีส่วนผสมของปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และปริมาณเถ้าลอยต่างกัน โดยได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $e$ -log  $\sigma_v'$  และ  $\varepsilon_v$ -log  $\sigma_v'$  ของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินที่มีค่าอัตราส่วนน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 12 ที่อายุบ่ม 28 วัน จะเห็นได้ว่าความเค้นครากของตัวอย่างทดสอบทุกส่วนผสมมีค่าเท่ากัน ดินซีเมนต์ที่มีค่าปริมาณความชื้นสูงกว่าจะเสถียรอยู่ที่อัตราส่วนโพรงสูงกว่า แต่ความเครียดเชิงปริมาตรจะมีค่าเท่ากันในทุกอัตราส่วนผสม

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามแนวแกนของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินที่อายุบ่ม 28 วัน โดยแปรผันปริมาณความชื้น 3 ค่า คือ 1.0 1.5 และ 2.0 เท่าของ Liquidity index ปริมาณเถ้าลอย 3 ค่า คือ 0 10 และ 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และปริมาณปูนซีเมนต์เพื่อให้ได้อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 4 7 และ 12 จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากัน กำลังอัดแกนเดียวมีใกล้เคียงกัน และกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาดินซีเมนต์ของ Horpibulsuk et al. (2005)



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินที่อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 4.9 การอัดตัวของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน

ในสร้างสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย เลือกใช้พารามิเตอร์  $B$  ของเถ้าลอย ถ่านหินและเถ้าชีวมวลเท่ากับ 1.27 ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ  $k$  ของเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล 0.75 ดังนั้นเขียนอัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อายุบ่มค่าหนึ่งได้ดังสมการที่ 4.5

$$\left[ \frac{q_{(w_c/C)_1}}{q_{(w_c/C)_2}} \right] = \left[ \frac{A/(w_c/C_i(1+0.75F))_1^{1.27}}{A/(w_c/C_i(1+0.75F))_2^{1.27}} \right] = \left[ \frac{(w_c/C_i(1+0.75F))_2^{1.27}}{(w_c/C_i(1+0.75F))_1^{1.27}} \right] \quad (4.5)$$

เมื่อ  $q_{(w_c/C)_1}$  และ  $q_{(w_c/C)_2}$  คือ กำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการทราบค่าและกำลังอัดแกนเดียวที่ทราบค่า ตามลำดับ ส่วน  $(w_c/C)_1$  และ  $(w_c/C)_2$  คือ อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต้องการทราบค่าและทราบค่า ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม สมการที่ 4.5 ยังมีข้อจำกัด คือ สามารถหาค่ากำลังอัดแกนเดียวได้เฉพาะที่อายุบ่มเดียวกันเท่านั้น ซึ่งหากมีความจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เพื่อลดอายุบ่มแต่ยังต้องการ

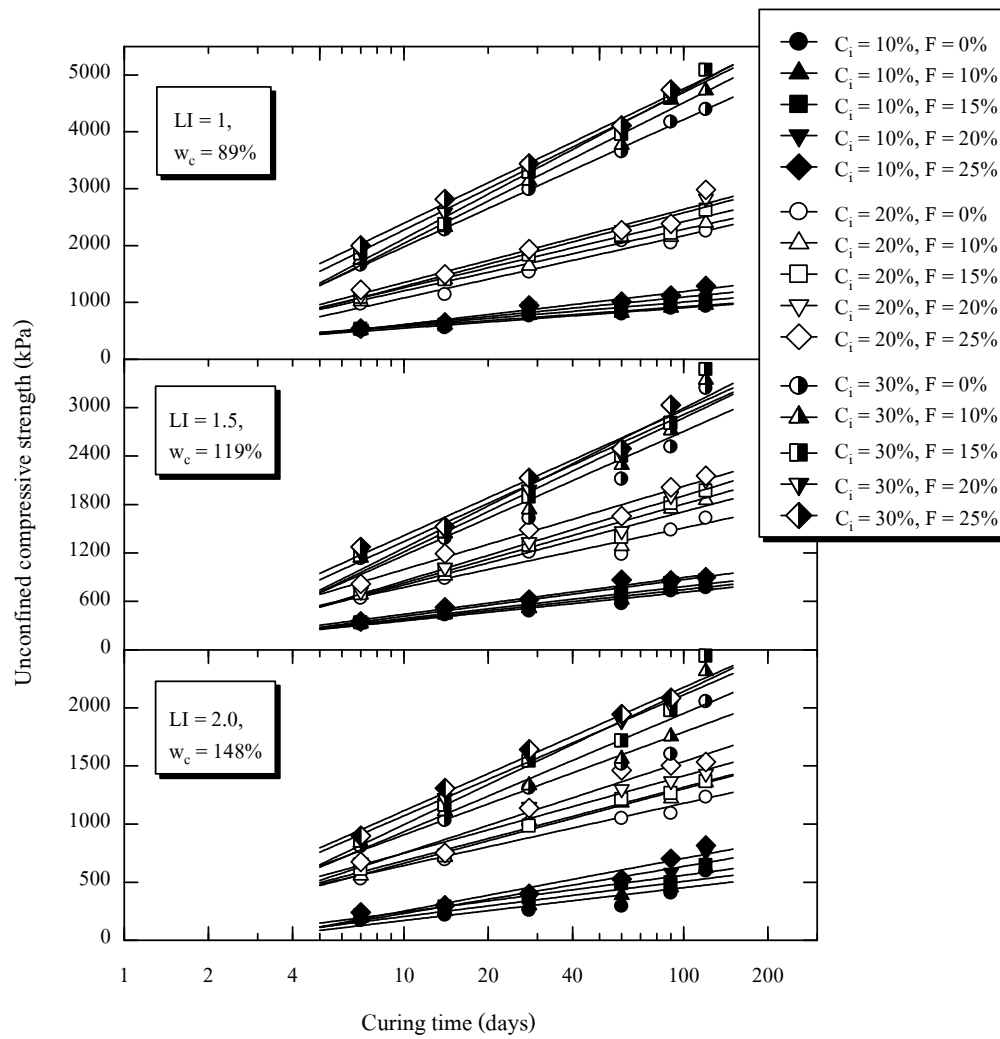
กำลังอัดเท่าเดิมยังไม่สามารถทำได้ จึงต้องสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย ปริมาณความชื้น และอายุบ่มซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

#### 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม

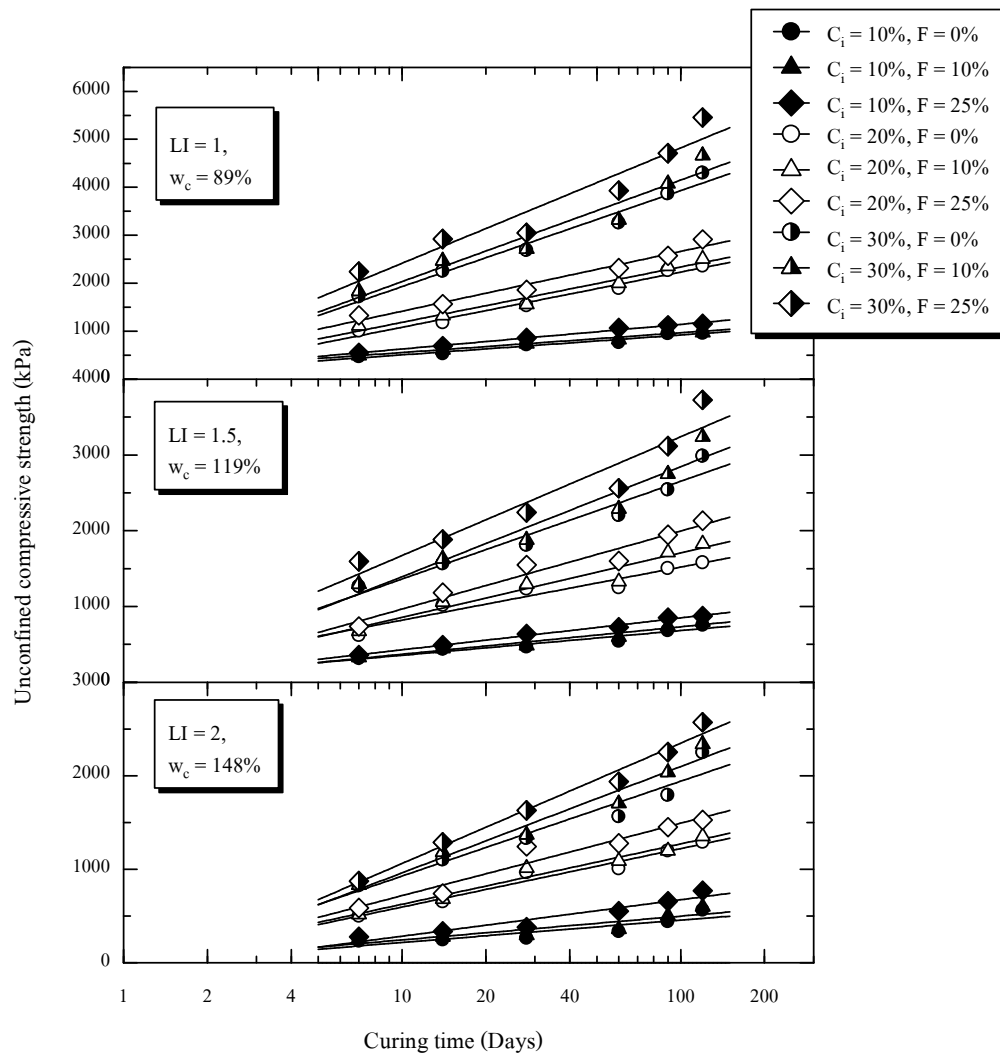
รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอยและปริมาณความชื้นต่าง ๆ ของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล จากการสังเกตพบว่า กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม เนื่องจากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวลทำหน้าที่เป็นวัสดุกระจายอนุภาคดินซีเมนต์ ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นการพัฒนากำลังอัดกับเวลาจึงขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลักซึ่งถูกควบคุมโดยพารามิเตอร์  $A$  เท่านั้น ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.6

$$\frac{q_{D1}}{q_{D2}} = \frac{A_{D1}}{A_{D2}} = \text{ค่าคงที่} \quad (4.6)$$

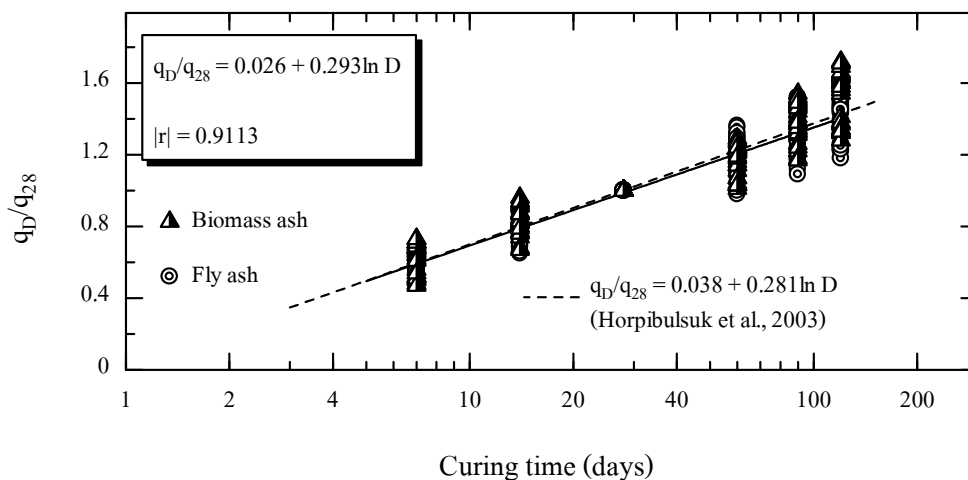
เมื่อ  $q_{D1}$  คือ กำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการทราบค่าที่อายุบ่ม  $D_1$  วัน และ  $q_{D2}$  คือ กำลังอัดแกนเดียวที่ทราบค่าที่อายุบ่ม  $D_2$  วัน  $A_{D1}$  และ  $A_{D2}$  คือพารามิเตอร์  $A$  ที่สอดคล้องกับอายุบ่ม  $D_1$  และ  $D_2$  ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม  
ของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม  
ของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม  
ภายใต้สภาวะตัวแปรต่าง ๆ และการ Normalization

จากหลักการดังแสดงด้วยสมการที่ 4.6 ผู้วิจัยได้ทำการ Normalization ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับอายุบ่ม ( $D$ ) ภายใต้สภาวะตัวแปรต่าง ๆ คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และปริมาณความชื้นของเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล โดยใช้ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน เป็นค่าอ้างอิง ดังรูปที่ 4.12 ได้สมการอัตรากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยดังสมการที่ 4.7 ผลจากการ Normalization ของผลทดสอบทั้งสองจะได้

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.026 + 0.293 \ln D \quad (4.7)$$

เมื่อ  $q_D$  และ  $q_{28}$  คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม  $D$  ใด ๆ และกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าที่อายุบ่ม 28 วันตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบดินซีเมนต์ของ Horpibulsuk et al. (2003) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

#### 4.5 สมการทำนายกำลังอัดในพจน์ของตัวแปรควบคุม

เนื่องจากพารามิเตอร์  $B$  และ  $k$  มีค่าประมาณ 1.27 และ 0.75 ตามลำดับ ทำให้เราได้สมการอัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ใด ๆ ที่อายุบ่มค่าหนึ่งตามสมการที่ 4.5 จากการรวมสมการดังกล่าวกับสมการที่ 4.7 จะ

ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ และ อายุบ่มในช่วงความชื้นของดินมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 2.0 เท่าของ Liquidity index ดังนี้

จากสมการที่ 4.5 เมื่อเขียนสมการอัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เก่าที่อายุบ่ม  $D$  ที่ค่า  $(w_c/C)_1$  และ  $(w_c/C)_2$  ใด ๆ และที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ค่า  $(w_c/C)_1$  และ  $(w_c/C)_3$  ใด ๆ จะได้ ดังสมการที่ 4.5ก และ 4.5ข ตามลำดับ

$$q_{(w_c/C)_{2,D}} = q_{(w_c/C)_{1,D}} \left[ \frac{\left( w_c/C_i (1 + 0.75F) \right)_{1,D}}{\left( w_c/C_i (1 + 0.75F) \right)_{2,D}} \right]^{1.27} \quad (4.5ก)$$

$$q_{(w_c/C)_{3,28}} = q_{(w_c/C)_{1,28}} \left[ \frac{\left( w_c/C_i (1 + 0.75F) \right)_{1,28}}{\left( w_c/C_i (1 + 0.75F) \right)_{3,28}} \right]^{1.27} \quad (4.5ข)$$

เมื่อหารสมการที่ 4.5ก ด้วยสมการที่ 4.5ข จะได้

$$\frac{q_{(w_c/C)_{2,D}}}{q_{(w_c/C)_{3,28}}} = \left[ \frac{q_{(w_c/C)_{1,D}}}{q_{(w_c/C)_{1,28}}} \right] \frac{\left[ \frac{\left( w_c/C_i (1 + 0.75F) \right)_{1,D}}{\left( w_c/C_i (1 + 0.75F) \right)_{2,D}} \right]^{1.27}}{\left[ \frac{\left( w_c/C_i (1 + 0.75F) \right)_{1,28}}{\left( w_c/C_i (1 + 0.75F) \right)_{3,28}} \right]^{1.27}}$$

แต่  $(w_c/C)_{1,D}$  และ  $(w_c/C)_{1,28}$  มีค่าเท่ากันดังนั้น

$$\frac{q_{(w_c/C)_{2,D}}}{q_{(w_c/C)_{3,28}}} = \left[ \frac{q_{(w_c/C)_{1,D}}}{q_{(w_c/C)_{1,28}}} \right] \left[ \frac{\left( w_c/C_i (1 + 0.75F) \right)_{3,28}}{\left( w_c/C_i (1 + 0.75F) \right)_{2,D}} \right]^{1.27} \quad (4.5ค)$$



เทอมทางขวามือของสมการที่ 4.5ค เป็นอัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม  $D$  วัน ต่อ กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ค่า  $w_c / C$  ค่าเดียวกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับสมการที่ 4.6 และ 4.7 ดังนั้น เมื่อจัดให้อยู่ในรูปทั่วไปจะได้ดังสมการที่ 4.8 สำหรับดินซีเมนต์เถ้าลอย

$$\left[ \frac{q_{(w_c/C)_D}}{q_{(w_c/C)_{28}}} \right] = \left[ \frac{w_c / C_i (1 + 0.75F)_{28}}{w_c / C_i (1 + 0.75F)_D} \right]^{1.27} (0.026 + 0.293 \ln D) \quad (4.8)$$

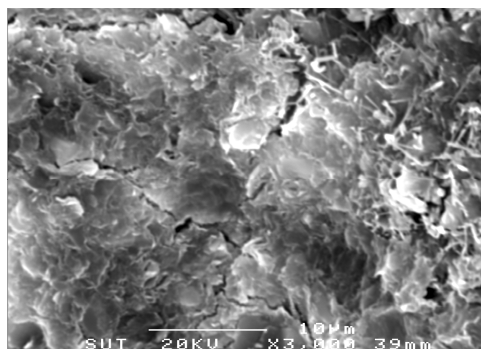
เมื่อ  $q_{(w_c/C)_D}$  คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ต้องการทราบที่มีค่า  $(w_c / C)$  ใด ๆ ที่อายุบ่ม  $D$  วัน และ  $q_{(w_c/C)_{28}}$  คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ทราบค่า ที่มีค่า  $(w_c / C)$  ใด ๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน

#### 4.6 การวิเคราะห์ด้านโครงสร้างจุลภาค

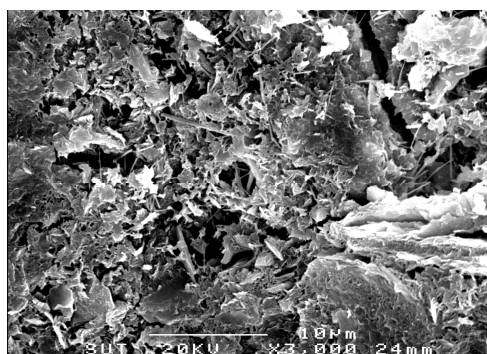
รูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์ที่มีค่าอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 4 และ 12 ตามลำดับ แต่มีปริมาณน้ำที่แตกต่างกันสามค่า ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่าที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากัน ขนาดโพรงและปริมาณสารเชื่อมประสานในดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำและปริมาณปูนซีเมนต์ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษา Thermal gravimetry analysis (TGA) ในตารางที่ 4.2 ปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับอิทธิพลร่วมของปริมาณความชื้นซึ่งมีผลต่อปริมาณช่องว่างในดินซีเมนต์และปริมาณปูนซีเมนต์ซึ่งมีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันของดินซีเมนต์

รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีค่าอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากันจะให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงกัน และดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีค่าปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์ต่ำกว่าจะมีกำลังอัดสูงกว่าดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์สูงกว่า สามารถอธิบายได้โดยการศึกษา Thermal gravimetry analysis ตารางที่ 4.3 แสดงผลของปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 4 และ 12 อายุบ่ม 28 วัน และมีปริมาณน้ำในดินเท่ากันแต่มีปริมาณซีเมนต์ต่างกันซึ่งปริมาณซีเมนต์ถูกทดแทนโดยการใส่เถ้าลอยเพื่อให้ค่าอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากัน จะเห็นได้ว่าดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากันจะให้ค่า  $\text{Ca(OH)}_2$  ใกล้เคียงกัน ส่วนดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่าจะมีปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในปริมาณที่สูงกว่า

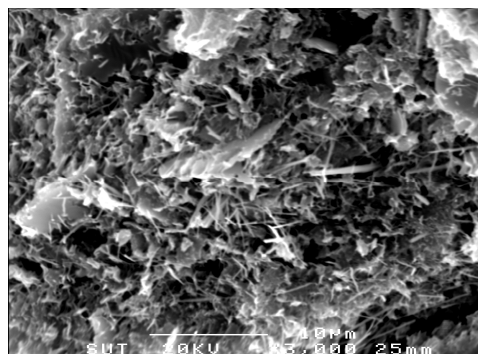
ผลทดสอบดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินที่อายุบ่ม 120 วันดังแสดงในรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าผิวของเถ้าลอยยังคงกลมและเรียบไม่ถูกกัดกร่อนโดยปฏิกิริยาปอซโซลานิก สอดคล้องกับผลของยุทธนา รักษาชนม์ (2551) ที่พบว่าเถ้าลอยที่ใส่ในดินซีเมนต์จะทำหน้าที่กระจายอนุภาคดินซีเมนต์ทำให้ดินซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น เถ้าลอยในดินซีเมนต์แทบไม่ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันเพียงอย่างเดียว เมื่อนำมาพิจารณาพร้อมกับหลักการปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า ดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากันให้ค่าปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ใกล้เคียงกัน ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าลอยนี้ช่วยสนับสนุนหลักการตัวแปรปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์และหลักการปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่าสามารถนำมาใช้ร่วมกันในการศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยได้



(a)  $w_c/C = 4$  ( $w_c = 89\%$ )

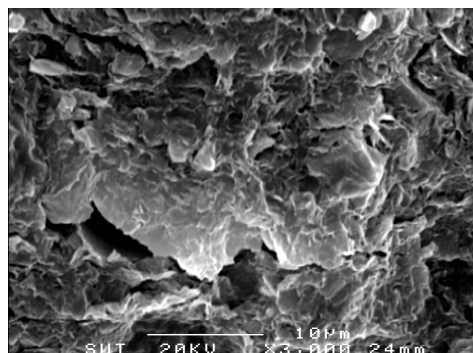


(b)  $w_c/C = 4$  ( $w_c = 119\%$ )

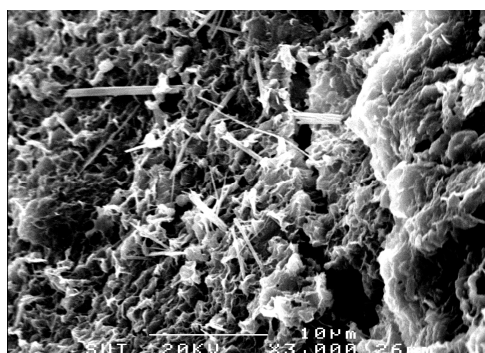


(c)  $w_c/C = 4$  ( $w_c = 148\%$ )

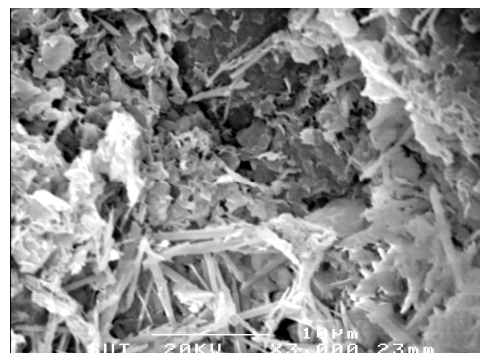
รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่าของดินซีเมนต์อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 4



(a)  $w_c/C = 12$  ( $w_c = 89\%$ )



(b)  $w_c/C = 12$  ( $w_c = 119\%$ )



(c)  $w_c/C = 12$  ( $w_c = 148\%$ )

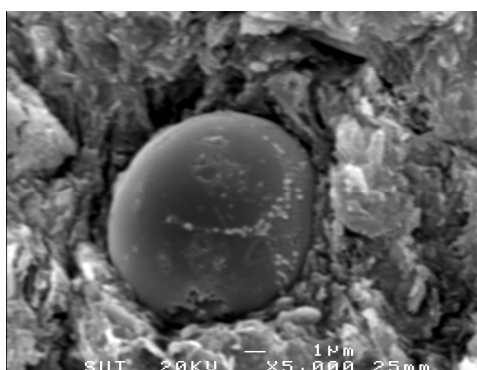
รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่าของดินซีเมนต์อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 12

ตารางที่ 4.2  $\text{Ca(OH)}_2$  ของดินซีเมนต์ที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 12 อายุบ่ม 28 วัน

$w_c/C$	Water content (%)	Cement content (%)	Fly ash content (%)	$\text{Ca(OH)}_2$ (%)
12	89	7.38	0	9.65
12	119	9.82	0	10.02
12	148	12.26	0	11.41

ตารางที่ 4.3  $\text{Ca(OH)}_2$  ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 4 และ 12 อายุบ่ม 28 วัน

$w_c/C$	Water content (%)	Cement content (%)	Fly ash content (%)	$\text{Ca(OH)}_2$ (%)
4	119	29.46	0	14.20
4	119	27.41	10	13.87
4	119	24.81	25	14.48
12	119	9.82	0	10.02
12	119	9.14	10	9.70
12	119	8.27	25	9.90



รูปที่ 4.15 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่าของดินซีเมนต์เถ้าลอยผ่านหินที่อายุบ่ม 120 วัน ( $w_c = 89\%$   $C = 30\%$   $F = 25\%$ )

#### 4.7 การตรวจสอบสมการทำนายกำลัง

เมื่อได้สมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอย ในหัวข้อนี้แสดงการตรวจสอบความถูกต้องของสมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลซึ่งเป็นข้อมูลของผู้วิจัย และเป็นข้อมูลที่ไม่ได้นำมาวิเคราะห์ผลในหัวข้อที่ 4.3 ผลจากการใช้สมการของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลเปรียบเทียบกับผลทดลองจริงแสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าความผิดพลาดของผลการทำนายจากค่า Mean Absolute Percent Error (MAPE) เท่ากับ 6.63 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม นอกจากนี้ผู้วิจัยยังใช้สมการทำนายกำลังอัดกับงานวิจัยของวิรัช ภูมิอ้อย และ รุ่งลาวัลย์

ราชัน (2552) ซึ่งเป็นดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล เปรียบเทียบกับกำลังอัดจริงดังแสดงในตารางที่ 4.4 มีค่าความผิดพลาดของผลการทำนายจากค่า Mean Absolute Percent Error, MAPE เท่ากับ 13.63 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ในทางวิศวกรรมเช่นเดียวกัน และรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังอัด ( $q_{up}/q_{ul}$ ) จะพบว่าค่าส่วนใหญ่อยู่ในกรอบความเชื่อมั่น 80%

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล จากแบบจำลอง และจากการวัด (ข้อมูลของผู้วิจัย)

Time (days)	Moisture content $w_c$ (%)	Cement content $C_i$ (%)	Fly ash content $F$ (%cement)	$w_c/(C_i(I+kF))$	Labolatory strength $q_{ul}$ (kPa)	Predicted strength $q_{up}$ (kPa)	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ (%)
7	89	10	15	7.96	520	466	10.43
7	89	10	20	7.70	547	486	11.28
7	89	20	15	3.98	1138	1123	1.36
7	89	20	20	3.85	1237	1171	5.35
7	89	30	15	2.65	1882	1879	0.16
7	89	30	20	2.57	2141	1960	8.48
7	118	10	15	10.59	332	324	2.55
7	118	10	20	10.25	332	338	1.61
7	118	20	15	5.30	695	781	12.38
7	118	20	20	5.12	712	815	14.35
7	118	30	15	3.53	1371	1307	4.68
7	118	30	20	3.42	1467	1363	7.06
7	147	10	15	13.23	257	244	4.98
7	147	10	20	12.79	273	255	6.74
7	147	20	15	6.61	528	589	11.61
7	147	20	20	6.40	563	615	9.07
7	147	30	15	4.41	844	986	16.83
7	147	30	20	4.26	865	1029	18.94
14	89	10	15	7.96	630	624	0.96
14	89	10	20	7.70	664	651	1.94
14	89	20	15	3.98	1414	1505	6.49
14	89	20	20	3.85	1458	1570	7.71
14	89	30	15	2.65	2546	2519	1.05
14	89	30	20	2.57	2577	2627	1.96

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลอง และจากการวัด (ข้อมูลของผู้วิจัย) (ต่อ)

Time (days)	Moisture content $w_c$ (%)	Cement content $C_i$ (%)	Fly ash content, $F$ (%cement)	$w_c/(C_i(I+kF))$	Labolatory strength $q_{ul}$ (kPa)	Predicted strength $q_{up}$ (kPa)	$\frac{ q_{up}-q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ (%)
14	118	10	15	10.59	451	434	3.61
14	118	10	20	10.25	460	453	1.61
14	118	20	15	5.30	1103	1047	5.07
14	118	20	20	5.12	1169	1092	6.58
14	118	30	15	3.53	1652	1753	6.09
14	118	30	20	3.42	1795	1828	1.84
14	147	10	15	13.23	305	328	7.34
14	147	10	20	12.79	322	342	6.21
14	147	20	15	6.61	690	790	14.45
14	147	20	20	6.40	730	824	12.81
14	147	30	15	4.41	1223	1322	8.14
14	147	30	20	4.26	1224	1379	12.64
28	89	10	15	7.96	781	reference	reference
28	89	10	20	7.70	820	816	0.46
28	89	20	15	3.98	1627	1888	16.06
28	89	20	20	3.85	1755	1969	12.19
28	89	30	15	2.65	2855	3159	10.67
28	89	30	20	2.57	3038	3295	8.46
28	118	10	15	10.59	514	545	5.95
28	118	10	20	10.25	547	568	3.87
28	118	20	15	5.30	1314	1313	0.06
28	118	20	20	5.12	1353	1370	1.27
28	118	30	15	3.53	2056	2198	6.91
28	118	30	20	3.42	2150	2293	6.61
28	147	10	15	13.23	320	411	28.29
28	147	10	20	12.79	366	429	17.20
28	147	20	15	6.61	1052	991	5.77
28	147	20	20	6.40	1118	1033	7.56
28	147	30	15	4.41	1409	1658	17.71
28	147	30	20	4.26	1549	1730	11.65

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลอง และจากการวัด (ข้อมูลของผู้วิจัย) (ต่อ)

Time (days)	Moisture content $w_c$ (%)	Cement content $C_i$ (%)	Fly ash content $F$ (%cement)	$w_c/(C_i(I+kF))$	Labolatory strength $q_{ul}$ (kPa)	Predicted strength $q_{up}$ (kPa)	$\frac{ q_{up}-q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ (%)
60	89	10	15	7.96	895	957	6.92
60	89	10	20	7.70	945	998	5.64
60	89	20	15	3.98	2162	2308	6.75
60	89	20	20	3.85	2214	2408	8.76
60	89	30	15	2.65	3429	3863	12.65
60	89	30	20	2.57	3795	4029	6.18
60	118	10	15	10.59	659	666	1.04
60	118	10	20	10.25	713	695	2.54
60	118	20	15	5.30	1386	1606	15.84
60	118	20	20	5.12	1493	1675	12.20
60	118	30	15	3.53	2381	2688	12.89
60	118	30	20	3.42	2445	2803	14.64
60	147	10	15	13.23	428	502	17.45
60	147	10	20	12.79	486	524	7.92
60	147	20	15	6.61	1160	1212	4.45
60	147	20	20	6.40	1166	1264	8.41
60	147	30	15	4.41	1814	2028	11.76
60	147	30	20	4.26	1916	2115	10.39
90	89	10	15	7.96	1078	1050	2.62
90	89	10	20	7.70	1101	1095	0.50
90	89	20	15	3.98	2439	2532	3.84
90	89	20	20	3.85	2565	2641	2.97
90	89	30	15	2.65	4298	4238	1.41
90	89	30	20	2.57	4522	4420	2.25
90	118	10	15	10.59	747	731	2.15
90	118	10	20	10.25	785	762	2.91
90	118	20	15	5.30	1771	1762	0.53
90	118	20	20	5.12	1888	1838	2.70
90	118	30	15	3.53	2822	2948	4.48
90	118	30	20	3.42	2994	3075	2.71

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลอง และจากการวัด (ข้อมูลของผู้วิจัย) (ต่อ)

Time (days)	Moisture content $w_c$ (%)	Cement content $C_i$ (%)	Fly ash content $F$ (%cement)	$w_c/(C_i(1+kF))$	Labolatory strength $q_{ul}$ (kPa)	Predicted strength $q_{up}$ (kPa)	$\frac{ q_{up}-q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ (%)
90	147	10	15	13.23	565	551	2.49
90	147	10	20	12.79	587	575	2.00
90	147	20	15	6.61	1248	1329	6.47
90	147	20	20	6.40	1399	1386	0.93
90	147	30	15	4.41	2162	2224	2.87
90	147	30	20	4.26	2227	2320	4.17
120	89	10	15	7.96	1092	1116	2.16
120	89	10	20	7.70	1138	1164	2.25
120	89	20	15	3.98	2689	2691	0.06
120	89	20	20	3.85	2851	2807	1.54
120	89	30	15	2.65	4949	4504	9.00
120	89	30	20	2.57	5336	4697	11.97
120	118	10	15	10.59	808	776	3.90
120	118	10	20	10.25	840	810	3.57
120	118	20	15	5.30	1906	1872	1.78
120	118	20	20	5.12	1983	1953	1.55
120	118	30	15	3.53	3287	3133	4.68
120	118	30	20	3.42	3497	3268	6.54
120	147	10	15	13.23	614	586	4.55
120	147	10	20	12.79	748	611	18.29
120	147	20	15	6.61	1381	1412	2.27
120	147	20	20	6.40	1469	1473	0.26
120	147	30	15	4.41	2426	2364	2.57
120	147	30	20	4.26	2544	2465	3.08
Mean Absolute Percent Error, MAPE				$\left( \text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100 \right)$			6.63



ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลองและจากการวัด (วีรยา นิมอ้อย และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน, 2552)

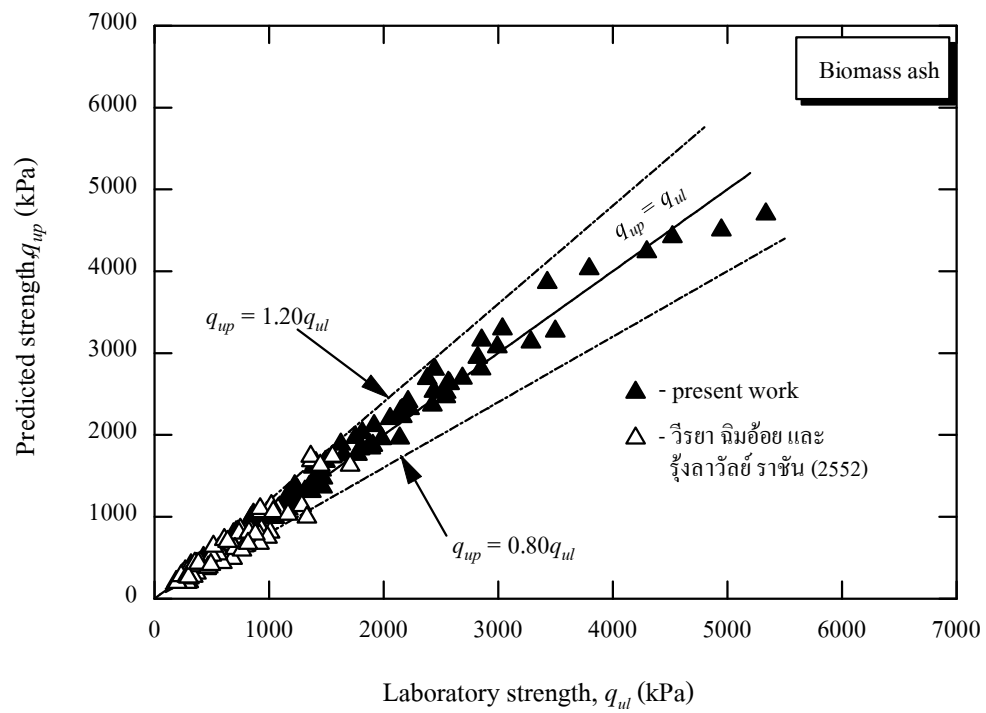
Time (days)	Moisture content $w_c$ (%)	Cement content $C_i$ (%)	Fly ash content $F$ (%cement)	$w_c/(C_i(I+kF))$	Labolatory Strength $q_{ul}$ (kPa)	Predicted Strength $q_{up}$ (kPa)	$\frac{ q_{up}-q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ (%)
7	92	23	11	3.78	504	500	0.80
7	92	18	11	4.73	457	377	17.63
7	92	20	25	3.88	504	484	3.93
7	92	16	25	4.85	457	364	20.24
7	103	41	0	2.50	929	845	8.95
7	103	37	11	2.56	945	819	13.34
7	103	12	11	7.69	300	203	32.38
7	103	33	25	2.63	895	792	11.49
7	103	11	25	7.89	285	196	31.18
7	111	32	0	3.50	593	552	7.07
7	111	25	0	4.44	467	408	12.65
7	111	20	0	5.50	366	311	15.10
7	111	23	11	4.55	347	395	13.74
7	111	18	11	5.69	248	298	20.01
7	111	20	25	4.67	360	382	6.23
7	111	16	25	5.84	266	288	8.09
7	130	38	0	3.45	593	562	5.25
7	130	20	0	6.50	305	251	17.69
7	168	67	0	2.50	751	845	12.51
7	168	22	0	7.50	190	209	10.22
7	168	30	11	5.13	270	339	25.60
7	168	20	11	7.69	196	203	3.69
7	168	54	25	2.63	825	792	3.93
7	168	27	25	5.26	287	328	14.38
7	168	18	25	7.90	200	196	1.85
14	92	25	0	3.69	701	691	1.43
14	92	20	0	4.61	601	521	13.26
14	92	23	11	3.78	658	670	1.83
14	92	18	11	4.73	597	505	15.43
14	92	20	25	3.88	799	649	18.84
14	92	16	25	4.85	683	489	28.44

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลองและจากการวัด (วีรยา นิมอ้อย และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน, 2552) (ต่อ)

Time (days)	Moisture content $w_c$ (%)	Cement content $C_i$ (%)	Fly ash content $F$ (%cement)	$w_c/(C_i(I+kF))$	Labolatory strength $q_{ul}$ (kPa)	Predicted strength $q_{up}$ (kPa)	$\frac{ q_{up}-q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ (%)
14	103	41	0	2.50	1285	1134	11.78
14	103	37	11	2.56	1080	1098	1.64
14	103	19	11	5.13	550	455	17.26
14	103	12	11	7.69	340	272	20.06
14	103	33	25	2.63	930	1062	14.20
14	103	16	25	5.26	593	440	25.76
14	103	11	25	7.89	295	263	10.68
14	111	25	0	4.44	553	547	1.20
14	111	21	0	5.24	400	443	10.83
14	111	23	11	4.55	502	530	5.56
14	111	18	11	5.69	345	399	15.62
14	111	16	25	5.84	470	386	17.95
14	168	67	0	2.50	1020	1134	11.11
14	168	22	0	7.50	234	281	19.95
14	168	60	11	2.56	924	1098	18.75
14	168	20	11	7.69	283	272	3.85
14	168	18	25	7.90	298	263	11.70
28	92	25	0	3.69	867	ref	ref
28	92	23	11	3.78	934	841	11.10
28	92	20	25	3.88	1010	813	24.13
28	111	25	0	4.44	734	686	6.94
28	111	23	11	4.55	684	664	3.04
28	111	20	25	4.67	786	643	22.37
60	92	25	0	3.69	1037	1060	2.19
60	92	20	0	4.61	738	799	8.30
60	92	23	11	3.78	1166	1028	11.80
60	92	18	11	4.73	918	774	15.64
60	92	20	25	3.88	1332	995	25.34
60	92	16	25	4.85	986	749	24.00
60	103	41	0	2.50	1555	1738	11.78
60	103	14	0	7.50	353	431	21.82

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลองและจากการวัด (วีรยา นิมอ้อย และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน, 2552) (ต่อ)

Time (days)	Moisture content $w_c$ (%)	Cement content $C_i$ (%)	Fly ash content $F$ (%cement)	$w_c/(C_i(I+kF))$	Labolatory Strength $q_{ul}$ (kPa)	Predicted Strength $q_{up}$ (kPa)	$\frac{ q_{up}-q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ (%)
60	103	37	11	2.56	1370	1683	22.89
60	103	19	11	5.13	880	698	20.68
60	103	33	25	2.63	1709	1629	4.71
60	103	16	25	5.26	918	675	26.46
60	111	25	0	4.44	839	838	0.04
60	111	20	0	5.50	514	639	24.36
60	111	23	11	4.55	826	812	1.62
60	111	18	11	5.69	702	612	12.89
60	111	20	25	4.67	880	786	10.72
60	111	16	25	5.84	765	592	22.62
60	168	67	0	2.50	1364	1738	27.43
60	168	34	0	5.00	609	721	18.31
60	168	22	0	7.50	383	431	12.31
60	168	30	11	5.13	638	698	9.35
60	168	20	11	7.69	493	417	15.33
60	168	54	25	2.63	1448	1629	12.51
60	168	27	25	5.26	818	675	17.47
Mean Absolute Percent Error, MAPE				$\left( \text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100 \right)$		13.63	



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดจากการทำนายกับกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบ  
ของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล(ข้อมูลของผู้วิจัย และข้อมูลของวีรยา นิมอ้อย และ  
รุ่งลาวัลย์ ราชัน, 2552)

U-MARK  
Q 020/2550บริษัท ไทยเครื่องชั่ง จำกัด  
THAI SCALE CO., LTD.

104/51-52 ม.14 ถ.มิตรภาพ ต.โนนเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000

104/51-52 Moo 14 Mitrapab Rd., Naimeung, Meung, Khonkaen 40000

☎ 043-246-319 , 043-246-367 FAX 043-246-312

## ใบเสนอราคา QUOTATION

เรียน :

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เลขที่ใบเสนอราคา 5212035/KN04REV1

วันที่ 4/1/2553

ผู้แทนขาย คุณธนันท์ 087-0415111

บริษัทฯ มีความยินดีขอเสนอราคาสินค้ามาเพื่อท่านได้พิจารณา ดังนี้คือ

ลำดับที่	รายการ	จำนวนเงิน
1	<p><b>เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ "SHINKO" MODEL : AJ - 6200E</b></p> <p>ผลิตภัณฑ์ของ SHINKO DENSHI CO.,LTD., ประเทศญี่ปุ่น</p> <p>ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 6,200 กรัม อ่านละเอียด 0.01 กรัม</p> <p>แสดงค่าน้ำหนักด้วยตัวเลข LCD สีดำ ขนาดใหญ่เห็นได้ชัด</p> <p>จานชั่งเป็นสแตนเลสขนาด 180 x 160 มม.</p> <p>อุปกรณ์รับน้ำหนักเป็นแบบ Tuning-Fork Sensor ให้ความแม่นยำในการชั่งสูง</p> <p>ไม่ต้องมีการ Warm-Up สามารถใช้เครื่องได้ทันที</p> <p>สามารถชั่งในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (เย็นจัดหรือร้อนจัด) ได้โดยไม่มีผลต่อความเที่ยงตรง</p> <p>สามารถนับชิ้นงานได้</p> <p>สามารถเลือกหน่วยการใช้ได้ เช่น g, ct, oz, lb.</p> <p>พร้อม RS 232C INTERFACE (STANDARD)</p> <p>เครื่องชั่ง "SHINKO" ทุกรุ่นผ่านการรับรองมาตรฐาน ISO-9001</p> <p>ผ่านการรับรองมาตรฐานจากสถาบัน "NMI" ประเทศเนเธอร์แลนด์</p> <p>ใช้ไฟฟ้า 220 V. ผ่าน AC ADAPTOR</p> <p>รับประกันคุณภาพ 1 ปี (สภาพใช้งานปกติ)</p> <p>พร้อมการ Calibration Certificate ISO/IEC 17025 : 2005</p>	<p>ราคาพิเศษเครื่องละ 29,550.00</p> <p>VAT 7% 2,068.50</p> <p>ราคาสุทธิ 31,618.50</p>

E-mail : thaiscale\_kn@yahoo.co.th.

กำหนดชำระเงิน เงินสด

กำหนดส่งสินค้า ภายใน 7-10 วัน หลังจากได้รับใบสั่งซื้อจากท่าน

ใบเสนอราคานี้ขึ้นราคาได้ 15 วัน

ธนันท์ ศรีวิลัย

ผู้แทนขาย

ธนันท์ ศรีวิลัย

ผู้จัดการสาขา

ผู้อนุมัติสั่งซื้อ

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยสองชนิด คือ เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวล พร้อมทั้งเสนอสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียว โดยแปรผันปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และอายุบ่ม สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ถ้ามีคุณสมบัติเป็นวัสดุกระจายตัว ในช่วงปริมาณเถ้าลอยไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ ทำให้อนุภาคของปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำได้ดีขึ้นส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวลมีประสิทธิภาพเทียบเท่า 0.75 เท่าของปูนซีเมนต์ พารามิเตอร์ปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่าสามารถนำมาใช้ร่วมกับพารามิเตอร์ปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ในการวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยได้

5.1.2 แบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล จากพารามิเตอร์ปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่าและพารามิเตอร์ปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ ผู้วิจัยได้เสนอแบบจำลองกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) ในรูปแบบของฟังก์ชันกำลัง (Power function) ดังสมการที่ 4.4

$$q_u = \frac{A}{\left( w_c / C_i (1 + kF) \right)^B} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $A$   $B$  และ  $k$  เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบโดย  $A$  จะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และอายุบ่ม ในขณะที่  $B$  มีค่าคงที่เท่ากับ 1.27 และ  $k$  มีค่าเท่ากับ 0.75

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่มของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวลแสดงดังสมการที่ 4.9

$$\left[ \frac{q_{(w_c/C)_D}}{q_{(w_c/C)_{28}}} \right] = \left[ \frac{w_c / C_i (1 + 0.75F)_{28}}{w_c / C_i (1 + 0.75F)_D} \right]^{1.27} (0.026 + 0.293 \ln D) \quad (4.9)$$



เมื่อ  $q_{(w_c/C)D}$  คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เกล็ดลอยที่ต้องการทราบที่มีค่า  $w_c/C$  ใด ๆ ที่อายุบ่ม  $D$  วัน และ  $q_{(w_c/C)28}$  คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เกล็ดลอยที่ทราบค่า ที่มีค่า  $w_c/C$  ใด ๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน

แบบจำลองที่นำเสนอเมื่อใช้ทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เกล็ดชีวมวล 2 ชนิด ให้ผลใกล้เคียงกับกำลังอัดที่วัดได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการใช้สมการและงานวิจัยต่อไป

5.2.1 การใช้สมการแบบจำลองทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์เกล็ดลอยจะต้องตรวจสอบให้แน่ใจก่อนว่าปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงค่า Liquidity Index ระหว่าง 1.0 ถึง 2.0 และปริมาณเกล็ดลอยมีค่าไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

5.2.2 ควรทำวิจัยเพิ่มกับดินชนิดอื่นเพื่อตรวจสอบว่าพารามิเตอร์  $A$  และ  $B$  ได้รับผลกระทบอย่างไรกับชนิดของดิน

## รายการอ้างอิง

- ัชชาวล เศรษฐบุตร. (2536). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. กรุงเทพฯ: บริษัทคอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล สุรเชษฐ์ จิงเกษมโชคชัย และ วราภรณ์ คุณาวนาทิจ. (2542). **คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและกายภาพของเถ้าลอย**. การสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. 7-19.
- ทรงพล บุญมาดี. (2529). **ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ CBR ของดินลูกรังผสมซีเมนต์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ทิน เกตุรัตน์บวร ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ เอกภพ อังสุวรรณ. (2535). การใช้เถ้าถ่านหินแยกขนาดจากแม่เมาะในงานคอนกรีตกำลังสูง. **วารสาร กฟผ.** 36-45.
- ทิน เกตุรัตน์บวร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2540). ความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการแยกขนาดต่อกำลังอัด และการกร่อนเนื่องกรดซัลฟริกของมอดาร์. **วารสาร กฟผ.** 53-61
- บุรชัย ฉัตรวิระ และ พิชัย นิมิตรยงสกุล. (2538). ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**. 37-51.
- ยุทธนา รักษาชนม์. (2551). **กำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดอัด**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ยุทธนา รักษาชนม์ และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข. (2552). **เถ้าลอย-วัสดุกระจายตัวในดินซีเมนต์. เอกสารประกอบการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14**. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- วรรณชัย เกษกัน. (2548). **กำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- วิศว จักรไพศาล และ ชัยโรจน์ จักรไพศาล. (2540). ผลของเถ้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกของคอนกรีตสมรรถนะสูง. **วารสาร กฟผ.** 60-67.
- วีรยา ภูมิอ้อย และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน. (2552). **ตัวประสิทธิภาพการแทนที่ด้วยเถ้าชีวมวลในดินเหนียวบวมตัวต่ำผสมซีเมนต์**. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร**. 32: 115-135.
- สมชัย กกกำแพง. (2539). **ศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะไปใช้ประโยชน์**. **โยธาสาร** 31-39 หน้า.



- สมชัย กกก้าแหง. (2535). การนำขี้เถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้างงานดิน. การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2535 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชาูปถัมภ์ 26-29 หน้า.
- สมหมาย สว่างกิจ และคณะ. (2535). การใช้เถ้าถ่านหินในการป้องกันกักกร่อนของคอนกรีต. เอกสารการประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2535 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 51-63
- สมิตร ส่งพิริยะกิจ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2538). การศึกษาการบดเถ้าจากแม่เมาะเพื่อให้เป็นสารปอซโซลานในการเพิ่มกำลังคอนกรีต. วารสาร สจธ. 27-36.
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน. (2546). ลักษณะการอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวซีเมนต์. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา. 25-31 หน้า.
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข รุ่งลาวัลย์ ราชัน ศิวฤทธิ์ หิรัญเรือง และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ. (2549). โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลอย. วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11.
- อนิรุทธิ์ ธงไชย และ สุเทพ นิ่มนวล. (2530). การใช้ประโยชน์ขี้เถ้าลอยในการเป็นวัสดุสร้างทางหลวง. รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ และ วิศว จักรไพศาล. (2542). ผลกระทบของขี้เถ้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง. การประชุมสัมมนาการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 90-97.
- Ahemed, S., Lovell, C. W., Jr., and Diamond, S. (1974). Pore size and Strength of compacted clay. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE.** 100: 407-425.
- American Society for Testing Material. (1995). **ASTM C 618-89: Specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete: ASTM.**
- Bengochea, I. G., Lovell, C. W., and Altschaeffli, A. G. (1979). Pore distribution and permeability of silty clays. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE,** 105: 839-856.
- Broms, B. B., and Boman, P. (1975). Lime stabilized column, **Proc., 5<sup>th</sup> Asian Regional conf., Indian Institute of science** (pp. 227-234). Bangalore, India. 1.
- Clare, K. E., and Pollard, A. E. (1954). The Effect of Curing Temperature the Compressive Strength of Soil-Cement Mixture. **Geotechnique.** 4(3): 97-107.

- Davidson, D. T. (1961). Soil stabilization with Portland cement. **Highway Research Board**. 200.
- Davidson, D. T., Pitre, G. L., Mateos, M., and Kalankamary, P. G. (1962). Moisture-density, Moisture-strength and compaction characteristic of cement-treated soil mixture. **Highway Research Board**. 42-63.
- Delage, P., and Lefebvre, G. (1984). Study on the structure of sensitive Champlin clay and of its evolution during consolidation. **Canadian Geotechnical Journal**. 21: 21-35.
- Felt, E. J. (1955). Factors influencing physical properties of soil-cement mixture. **Highway Research Board, Bulletin**. 108: 38-63.
- Griffiths, F. J., and Joshi, R. C. (1989). Change in pore size distribution due to consolidation of clay. **Geotechnique**. 39(1): 159-167.
- Horpibulsuk, S., Bergado, D. T., and Lorenzo, G. A. (2004). Compressibility of Cement Admixed Clays at High Water Content. **Geotechnique**. 54(2): 151-154.
- Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T. S. (2003). Assessment of strength development in cement-admixed high water content clay with Abrams's law as a basic. **Geotechnique**. 53(4): 439-444.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., and Bergado, D. T. (2004). Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**. 130(10):1096-1105.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Raksachon, Y. (2009). Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay. **Soils and Foundations**. 49(1): 85-98.
- Igarashi, S., Bentur, A., and Mindess, S. (1996). Microhardness testing of cementations materials. **Advanced Cement Based Materials**. 4: 48-57.
- Ingles, O. G., and Metcalf, J. B. (1972). **Soil Stabilization, Sydney, Butterworths**. 64-69.
- Kamon, M. (1979). **Study on engineering properties of very soft clay and it stabilization**. Doctoral dissertation, Kyoto University, Kyoto, Japan.
- Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y., and Honjo, Y. (1981). Deep mixing method using cement hardening agent. **Proc. of 10<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering** (pp. 721-724). Stockholm: (n. p.).

- Lambe, T. W., Mitchaels, A. S., and Moh, Z. C. (1959). Improvements of Soil-Cement with Alkali Compounds. **Highway Research Board, Bulletin.** 241: 67-103.
- Lapierre, C., Leroueil, S., and Locat, J. (1990). Mercury intrusion and permeability of Louisesevilly clay. **Canadian Geotechnical Journal.** 27: 761-773.
- Leadarand, J. A. (1956). Some Engineering Aspects of Soil-Cement Mixture. **Mid-South Section, ASCE.** 27: 64-69.
- Maclean, D. J., Robinson, P. J. M., and Webb, S. B. (1952). An Investigation of the Stabilization of Heavy Clay Soil with Cement for Road Base Construction. **Road and Road Construction.** 30(358): 287-292.
- Maner, A. W. (1952). Curing Soil Cement Base. **In Proceeding of Highway Research Board Vol. 31** (pp. 540-548). Washington, D.C.: National Research Council.
- Metcalf, J. B. (1977). Principle and application of cement and lime stabilization. **Australian Road Research Board.** 20 p.
- Mindess, S. (1996). Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone. In J. C. (ed.). **RILEM Technical Committee 108-ICC Report, E&FN SPON** (pp. 48-63). (n. p.).
- Mitsui, K., Li, Z., Lange, D.A., and Shah, D.P. (1994), Relation between microstructure and mechanical properties of the paste-aggregate interface, **ACI Materials Journal**, Vol.91, No.1, pp.30-39.
- Nagaraj, T. S., Vatasala, A., Srinivasa, and Murthy, B. R. (1990). Discussion on " Change in pore size distribution due to consolidation of clay " by Griffiths, F. J., and Joshi, R. C. **Geotechnique.** 40(2): 303-305.
- Ng, S. C. (1966). **Cement Stabilization of Lateritic Soil.** Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, No. 125, Seato Graduate School of Engineering.
- Norling, L. T., and Peckard, R. G. (1958). Expedited Short-Cut Test Method for Determining Cement Factor for Sandy Soil. **Highway Research Board, Bulletin.** 198: 20-31.
- Okamura, T., and Terashi, M. (1975). Deep lime mixing method of stabilization for marine clays. **Proc., 5<sup>th</sup> Asian Regional conf. on soil Mech., and Found. Engineering** (pp. 69-75). Bangalore, India: (n. p.).
- Reinhold, F. (1955). Elastic Behavior of Soil-Cement Mixtures. **Highway Research Board**

**Bulletin.** 108: 128-137.

Rhee, Y. H. (1982). **Soil Stabilization with lime and Fly Ash.** Master of Engineering Thesis, Asian Institute Technology.

Ruennkrairergsa, T. (1982). Principal of Soil Stabilization. **Group Training in Road Construction** (pp. 17-26). Bangkok, Thailand: (n. p.)

Sherwood, P.T. (1958). The effect of Sulphates on Cement Stabilization Clay. **Highway Research Board, Bulletin.** 198 : 45-54.

Tateishi, Y. (1997). **Geotechnical properties and stability of cut slope surface of Daitom earth.** Doctoral dissertation, Saga University, Saga, Japan.

Terashi, M., Tanaka, H., and Okumura, T. (1997). Engineering properties of lime treated marine soils and DMM. **Proc. 6<sup>th</sup> Asian Reg. Conf. SMFE.** 1: 191-194.

Terrel, R. L., Barenberg, E. J., Michell, J. M., and Thomson, M. R. (1979). **Soil Stabilization in Pavement Structure a User's Manual Mixture Design Consideration.** Washington: Government Printing Office.

Washburn, E. W. (1921). Note on a method of determining the distribution of pore sizes in porous materials. **Proceedings of the National Academy of Scienc.** 7: 115-116.

Winterkorn, H. F., and Chandrasekharn, E. C. (1951). Lateritic Soil and Their Stabilization. **Highway Research Board, Bulletin.** 44: 10-29.

Yamaguchi, H. (1992). Changes in pore distribution in isotropic consolidation and drained shear processes of undisturbed peat. **Journal of Geotechnical Engineering, JSCE.** III. 19: 1-8.

Yamaguchi, H., and Ikenaga, H. (1992). Pore structure of compacted soils. **Journal of Geotechnical Engineering, JSCE.** III. 19: 35-44.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



## ตัวแปรปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า – พารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์

### การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์แฉะลอย

## EQUIVALENT CEMENT CONTENT – A NEW PARAMETER FOR ANALYSIS OF STRENGTH DEVELOPMENT IN BLENDED CEMENT ADMIXED CLAY

อภิชาติ สุดดีพงษ์ (Apichat Suddepong)<sup>1</sup>

รุ่งลาวัลย์ ราชัน (Runglawan Rachan)<sup>2</sup>

สุกสันต์ หอพิบูลสุข (Suksun Horpibulsuk)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษานิเทศศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี suddepong8@hotmail.com

<sup>2</sup>อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รunglawat@gmail.com

<sup>3</sup>รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี suksun@g.sut.ac.th

**บทคัดย่อ :** บทความนี้ศึกษาอิทธิพลของแฉะลอยในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเหนียวอ่อนด้วยปูนซีเมนต์ จากการศึกษาพบว่าที่ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่มค่าหนึ่ง กำลังอัดของดินซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณแฉะลอยจนกระทั่งปริมาณแฉะลอยเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ในช่วงปริมาณแฉะลอยน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ แฉะลอยทำหน้าที่เป็นวัสดุกระจายตัวซึ่งทำให้อนุภาคดินเหนียวและปูนซีเมนต์กระจายตัวและสัมผัสกันได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีขึ้น ด้วยเหตุนี้เอง การใส่แฉะลอยในดินซีเมนต์จึงเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอตัวแปรใหม่สำหรับการวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ซึ่งเรียกว่า “ปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า” เมื่อประยุกต์ใช้ตัวแปรดังกล่าวร่วมกับ Clay-water/cement ratio hypothesis เราสามารถประมาณกำลังอัดของดินซีเมนต์แฉะลอยที่อายุบ่มหนึ่งๆ ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณแฉะลอย) ได้ จากการศึกษาพบว่าทุกอายุบ่ม แฉะลอยมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ 0.7 เท่าของปูนซีเมนต์ สำหรับทุกอัตราส่วนผสมระหว่างปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณแฉะลอย

**ABSTRACT :** The present paper investigates the influence of fly ash on the strength development in cement admixed soft clay. It is found from this investigation that for a particular water content, cement content and curing time, strength increases with fly ash content up to 25% of dry weight of cement. In this range, the role of fly ash is to disperse the clay-cement clusters into smaller clusters increasing the reactive surface and hence strength. In other words, the input of fly ash in clay-cement mixture is regarded akin to the effect of an increase in cement content. As such, the novel parameter is introduced and designated as equivalent cement content. When applied with clay-water/cement ratio hypothesis, the strength development at a particular curing time for any water content, cement content, and fly ash content can be assessed. It is found that for all curing time tested, fly ash content is equal to 0.7 cement content for all combinations of water content, cement content, and fly ash content.

**KEYWORDS :** Fly ash, Clay, Cement, Unconfined compressive strength

## 1. บทนำ

ในประเทศไทยเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งคือ เทคนิคการผสมลึก (Deep mixing technique) เทคนิคนี้ช่วยเพิ่มพันธะเชื่อมประสานให้กับดินด้วยสารเคมี (ซีเมนต์และปูนขาว เป็นต้น) โดยการสร้างเสาเข็มในชั้นดินเหนียวอ่อนเพื่อเปลี่ยนจากชั้นดินเหนียวอ่อนเป็นชั้นดินผสมลึก (Composite ground) ซึ่งความต้านทานการอัดตัวและกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุปูน [1]

วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากในเทคนิคการปรับปรุงดินนี้เป็นผลให้ราคาของการก่อสร้างมีค่าสูงเมื่อเทียบกับวิธีอื่น จึงมีความจำเป็นที่จะหาวัสดุที่มีราคาถูกกว่าเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ ได้แก่ เถ้าลอยอานหิน ในงานทางวิศวกรรมโครงสร้าง การประยุกต์ใช้เถ้าลอยอานหินเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย [2] แต่การใช้งานทางวิศวกรรมปฐพียังมีอยู่อย่างจำกัด

สุทธิธนา [3] และ Horpibulsuk et al. [4] ได้ทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าลอยและเถ้าลอยดินเหนียวและปูนซีเมนต์ต่างก็เป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ ดังนั้น เมื่อสัมผัสกับน้ำจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น (Clusters/Aggregates) การใช้เถ้าลอยในดินซีเมนต์จะช่วยให้อนุภาคของดินซีเมนต์กระจายตัวและสัมผัสกับน้ำได้ดีขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น นอกจากนี้ยังกล่าวอีกว่าปฏิกิริยาปอลิไซชันที่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์เถ้าลอยมีน้อยมากและแทบจะไม่ผลต่อการพัฒนากำลังอัด เนื่องจากปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่เกิดขึ้นมีปริมาณไม่เพียงพอต่อความต้องการของซิลิกาที่อยู่ในเถ้าลอย ปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่เกิดขึ้นน้อยเป็นผลมาจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงดินมีปริมาณต่ำ ซึ่งแตกต่างจากในงานคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดที่สูงมาก (โดยปกติจะมากกว่า 280 กิโลกรัมต่อตารางเมตร) ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการใส่เถ้าลอยในดินซีเมนต์เปรียบเสมือนการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ให้กับดินซีเมนต์ โดยมีค่าเท่ากับปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า (Equivalent cement content)

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเถ้าลอยต่อการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ พร้อมทั้งวิเคราะห์ลักษณะการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ หลักการวิเคราะห์จะอาศัย

พารามิเตอร์ปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (Clay-water/cement ratio,  $w/C$ ) [5-8] ร่วมกับสภาวะปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า พารามิเตอร์ทั้งสองนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ครั้งแรกในการวิเคราะห์ดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลโดย Rachan et al. [9]

## 2. วิธีการวิจัย

### 2.1 ตัวอย่างดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย

ดินตัวอย่างทดสอบเป็นดินเหนียวกรุงเทพฯ เก็บจากเขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ที่ระดับความลึก 3.0 - 4.0 เมตร ซิลิกาอัลลูมินาและฟอสฟอรัสมีค่าเท่ากับ 89 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดินตัวอย่างประกอบด้วยทราย ดินตะกอน และดินเหนียว ในปริมาณ 3, 27 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีค่าความอิ่มตัวเฉพาะเท่ากับ 2.63 ดินประเภทนี้จัดเป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูง (CH) ตามระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เถ้าลอยอานหินได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยอานหินแสดงดังตารางที่ 1 ดินตัวอย่างถูกนำดินร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อแยกเศษเปลือกหอยและเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่ออก และทำการปรับแก้ความชื้นในดินให้มีค่า Liquidity Index (LI) เท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 เพื่อจำลองการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นในขณะที่ทำการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยเทคนิคการผสมเปียก (Wet method)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยอานหิน

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอยอานหิน
$\text{SiO}_2$	45.63%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	24.59%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	11.26%
$\text{CaO}$	12.15%
$\text{MgO}$	2.87%
$\text{SO}_3$	1.57%
$\text{Na}_2\text{O}$	0.07%
$\text{K}_2\text{O}$	2.66%
LOI	1.23%

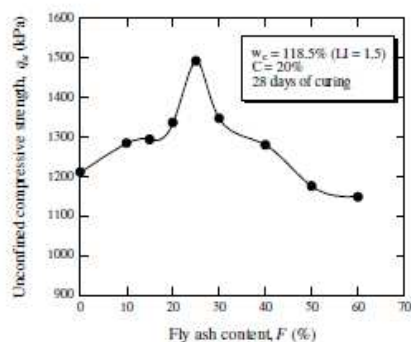


## 2.2 การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์แฉะ

ดินตัวอย่างที่ปริมาณน้ำความชื้นต่างๆ (LI = 1 ถึง 2) ถูกนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ในปริมาณ 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณแฉะเท่ากับ 0 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ จนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นบรรจุตัวอย่างดินซีเมนต์แฉะลงในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร โดยทำดินตัวอย่าง 3 ตัวอย่างในหนึ่งส่วนผสม หลังจากนั้นอีก 24 ถึง 48 ชั่วโมง ทำการถอดตัวอย่างดินซีเมนต์แฉะออกจากแบบหล่อและห่อด้วยฟิล์มถนอมอาหาร บ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิ ( $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) เป็นเวลา 7, 14 และ 28 เมื่อครบรอบการบ่มนำไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทันที ด้วยอัตราเร็วในการกด 1.0% ของความสูงดินตัวอย่างก่อนทำการทดสอบทั้งหมด

## 3. ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

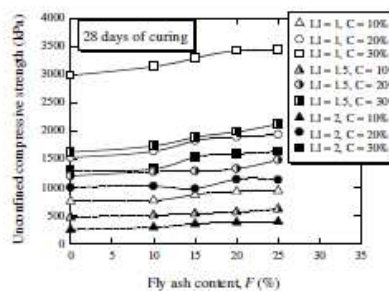
ภาพที่ 1 แสดงผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์แฉะที่ปริมาณความชื้น 118.5 เปอร์เซ็นต์ (LI = 1.5) ปริมาณปูนซีเมนต์ 20 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (ปริมาณแฉะน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์) หลังจากนั้นกำลังอัดมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และสามารถกล่าวได้ว่าปริมาณแฉะที่เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด



ภาพที่ 1 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์แฉะที่อายุบ่ม 28 วัน

ภาพที่ 2 แสดงการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์แฉะที่ปริมาณความชื้นและปริมาณซีเมนต์ต่างๆ สำหรับแฉะในปริมาณน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุบ่ม 28 วัน จะเห็นได้ว่า

กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณแฉะสำหรับทุกอัตราส่วนผสม ในอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์และแฉะที่เหมือนกัน ปริมาณความชื้นที่สูงกว่าให้กำลังอัดที่ต่ำกว่า เนื่องจากระยะห่างระหว่างอนุภาคดิน (Pore space) มีมากกว่า



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณแฉะของดินซีเมนต์แฉะ ที่อายุบ่ม 28 วัน

จากภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของแฉะในปริมาณน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ เปรียบเสมือนการเพิ่มปูนซีเมนต์ให้กับดินซีเมนต์ [9] ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า

$$C_c = kF \quad (1)$$

เมื่อ  $C_c$  คือปริมาณปูนซีเมนต์ที่เติมเข้า คือตัวแปรประสิทธิภาพ และ  $F$  คือปริมาณแฉะ ดังนั้น ปริมาณซีเมนต์ทั้งหมด ( $C$ ) ที่มีอยู่ในดินเหนียวจึงเท่ากับ

$$C = C_i + C_c \quad (2)$$

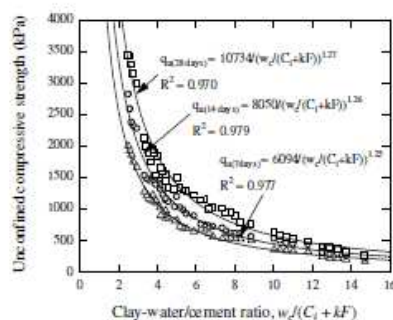
เมื่อ  $C_i$  คือปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใส่เริ่มต้น โดยการรวมสมการที่ (1) และ (2) เข้ากับตัวแปรปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่อายุบ่มใดๆ แสดงได้ดังนี้

$$q_u = \frac{A}{\left( \frac{w_c}{C_i + kF} \right)^B} \quad (3)$$

เมื่อ  $A$  และ  $B$  เป็นค่าคงที่ และ  $q_u$  คือกำลังอัดที่อายุบ่มใดๆ พารามิเตอร์  $A$ ,  $B$ , และ  $k$  สามารถหาได้จากกราฟทำ Non-linear regression ภาพที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์กำลังอัดของดินซีเมนต์แฉะที่อายุบ่ม 7, 14, และ 28 วัน ด้วยพารามิเตอร์อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ จะเห็นว่าความสัมพันธ์ที่นำเสนอสามารถใช้ได้กับดินซีเมนต์แฉะที่ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณแฉะใดๆ



ได้ ค่าของ  $A$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. [8] ในขณะที่  $B$  และ  $k$  มีค่าประมาณคงที่ สำหรับทุกอายุบ่มและอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ น้ำ และเถ้าลอย จากการศึกษานพบว่า  $B$  มีค่าประมาณ 1.25 ถึง 1.27 และ  $k$  มีค่าเท่ากับ 0.7 ดังนั้น จึงสามารถกล่าวได้ว่าเถ้าลอยมีประสิทธิภาพเป็น 0.7 เท่าของปูนซีเมนต์ หรือกล่าวอย่างง่ายว่า ในการเติมปูนซีเมนต์ 20 เปอร์เซ็นต์ ของดินแห้ง และเถ้าลอย 25 เปอร์เซ็นต์ ของปูนซีเมนต์ (5 เปอร์เซ็นต์ ของดินแห้ง) เทียบได้เท่ากับ การเติมปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเท่ากับ 23.5 เปอร์เซ็นต์ ของดินแห้ง



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์

#### 4. บทสรุป

บทความนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เถ้าลอยเป็นตัวกระจายตัวในดินซีเมนต์ บทสรุปที่สำคัญแสดงไว้ดังนี้

1. เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุกระจายตัวในช่วงปริมาณเถ้าลอยน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ ทำให้อนุภาคของปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำได้ดีขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น
2. เถ้าลอยมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ 0.7 เท่าของปูนซีเมนต์ สำหรับทุกอัตราส่วนผสมระหว่างปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และอายุบ่ม
3. พารามิเตอร์ปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่าสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับพารามิเตอร์ปริมาณน้ำในดินต่อ

ปริมาณปูนซีเมนต์ในการวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Broms, B. B. 1986. *Stabilization of soft clay with lime and cement column in Southeast Asia*, Applied Research Project RP10/83, Nanyang Technological Institute, Singapore.
- [2] Mindess, S. 1996. *Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone*, RILEM Technical Committee 108-ICC Report, E&FN SPON: 48-63.
- [3] อุทชนา วัฒนชัย. 2551. กำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างผลึกของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเกรดดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [4] Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Raksachon, Y. (2009). Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay, *Soils and Foundations*, 49(1): 85-98.
- [5] Horpibulsuk, S. and Miura, N. (2001). A new approach for studying behavior of cement stabilized clays, *Proc. 15<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul, Turkey, 3: 1759-1762.
- [6] Miura, N., Horpibulsuk, S. and Nagaraj, T.S. (2001). Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content, *Soil and Foundation*, 41(1): 33-45.
- [7] Miura, N., Horpibulsuk, S., and Nagaraj, T.S. (2001). Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content, *Soils and Foundations*, 41(5): 33-45.
- [8] Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj, T.S. (2003). Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis, *Geotechnique*, 53(4): 439-444.
- [9] Rachan, R., Chim-oye, W., and Horpibulsuk, S. (2009). Application of biomass fly ash as a pozzolanic material for stabilization of low-swelling clay, *Lowland Technology International*, 11(1) (in press).
- [10] Papadakis V.G. and Tsimas, S. (2002). Supplementary cementing materials in concrete Part I: efficiency and design. *Cement and Concrete Research*, 32, 1525-1532.

## ประวัติผู้เขียน

นายอภิชาติ สูดิพงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 28 เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดสระบุรี บิดาชื่อ นายไพฑูรย์ สูดิพงษ์ มารดาชื่อนางบุญนาค สูดิพงษ์ สำเร็จการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาจาก โรงเรียนก้านวิทยา ตำบลหนองหนองแค อำเภอนองแค จังหวัดสระบุรี ในปีการศึกษา 2537 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนหนองแคสรกิจ “สรกิจ” พิทยา อำเภอนองแค จังหวัดสระบุรี ในปีการศึกษา 2540 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนอัสสัมชัญ ระยอง ในปีการศึกษา 2543 หลังจากสำเร็จการศึกษามีความตั้งใจอยากเป็นวิศวกรโยธา จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2548 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2550